



Tiago Casaleiro Dias

Licenciado em Ciências da Engenharia e Gestão Industrial

**Ferramenta de avaliação de microrredes
energéticas P2P e aplicação a microrredes
suportadas pela tecnologia blockchain**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Aneesh Zutshi, Professor Auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova
de Lisboa

Júri

Presidente: Rogério Salema Araújo Puga Leal, Professor Auxiliar
Arguente: António Carlos Bárbara Grilo, Professor Associado com Agregação



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro, 2019

Ferramenta de avaliação de microrredes energéticas P2P e aplicação a microrredes suportadas pela tecnologia blockchain

Copyright © Tiago Casaleiro Dias, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família. De sangue e lá de casa.

AGRADECIMENTOS

Decidi que os agradecimentos seriam a última tarefa a realizar da minha tese, por forma, a incluir todas as pessoas que me ajudaram.

Agradeço ao Professor Aneesh Zutshi, orientador da dissertação, pela disponibilidade, pela partilha de opiniões e por todas as sugestões ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas de faculdade que me ajudaram a chegar a este momento, durante os últimos 5 anos.

Agradeço aos meus amigos mais próximos, que me motivaram a trabalhar arduamente na realização da dissertação.

E por último, e em especial, agradeço aos meus pais e irmã pelo afeto, confiança e apoio incondicional que sempre depositaram em mim. E, ainda, por todos os sacrifícios que fizeram por mim ao longo dos últimos anos.

Obrigado a todos.

RESUMO

O desenvolvimento das fontes de energia renovável permitiu aos consumidores a instalação individual de equipamentos de produção energética renovável. Assim, os consumidores passaram a produtores-consumidores com capacidade de produção de eletricidade. Em determinados momentos, a eletricidade que é produzida em excesso e desperdiçada. As empresas do setor energético acabaram por aplicar o conceito de economia partilhada ao aproveitamento do excesso de energia. Esta aplicação veio permitir um aproveitamento mais eficiente dos recursos, mas o processo manteve-se como uma interação centralizada entre o consumidor, o produtor-consumidor e a empresa de energia em que, o último, controla centralmente todos os processos do negócio. No sentido de manter a eficiência de utilização da energia através da economia de partilha e permitir uma interação económica e energética descentralizada, tem vindo a ser investigado o desenvolvimento de microrredes energéticas locais *Peer-to-Peer*(P2P). Assim, surge a necessidade de avaliar os projetos que estão a aplicar a tecnologia, e é nesse sentido que eu proponho a criação de uma ferramenta de avaliação de microrredes energéticas P2P.

Como esta dissertação visa a avaliação de microrredes energéticas P2P, é realizada uma contextualização da tecnologia da perspetiva socio-económica, regulamentar e operacional. A tecnologia *blockchain* tem sido um dos principais impulsionadores do desenvolvimento de sistemas energéticos distribuídos, e como tal, foi feita uma análise dos princípios fundamentais da tecnologia. Em seguida, foi apresentado o trabalho académico desenvolvido na exploração de microrredes energéticas suportadas pela tecnologia *blockchain*. Formula-se a ferramenta de avaliação de microrredes energéticas P2P, construída com base na identificação das propriedades-chaves que as podem caracterizar num âmbito geral. Por fim, a utilidade da ferramenta foi comprovada através aplicação da ferramenta a 2 casos práticos de microrredes energéticas P2P suportadas pela *blockchain*: a microrrede de Brooklyn e a microrrede da T77.

Palavras-chave: microrredes energéticas, *peer-to-peer*, energias renováveis, painéis fotovoltaicos, sistemas energéticos distribuídos, descentralização, eficiência energética, *blockchain*

ABSTRACT

The development of renewable energy sources allowed consumers to install individual renewable energy production equipment. That transformed consumers into prosumers. Electricity has times that is consumed right after production and then it has times that is not needed, and it ends up being wasted to the environment. Companies in the energy sector ended up applying the concept of the sharing economy to fix the imbalances associated to prosumer's renewable energy production. This application ended up allowing a more efficient use of resources, but the process remained as a centralized interaction between three participants: the consumer, the prosumer and the utility company. With the intention to maintain the efficiency on the electricity use through the sharing economy and to allow a decentralized economical and energetic interaction, the development of energy P2P microgrids has been investigated. Thus, a necessity arises: to evaluate the energy P2P microgrid projects in development. So, on this dissertation, I'm proposing the creation of a tool to assess the characteristics of a P2P microgrid.

In this dissertation, there is a contextualization on energy P2P microgrids. Blockchain technology has been recognized as one of the biggest enablers of this kind of energy businesses, so an analysis about the blockchain technology main principles was made. Then, the scientific work done on the contribution of blockchain technology to energy P2P microgrids is reviewed. The evaluation tool of energy P2P microgrids is developed, based on the identification of the main properties that can characterize them in a general point of view. Then, the tool validation is achieved through its application to 2 real life implementation cases of energy P2P microgrids enabled by blockchain technology: the Brooklyn microgrid and the T77 microgrid.

Keywords: energy microgrids; peer-to-peer, renewable energies, photovoltaic panels, distributed energy systems, decentralization, energetic efficiency, blockchain

ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.1.1	Energia fotovoltaica	1
1.1.2	Economia de partilha no mercado energético	2
1.1.3	Introdução das microrredes energéticas	3
1.2	Objetivo	4
1.3	Estrutura da dissertação	5
2	Revisão da literatura	7
2.1	Introdução ao mercado energético P2P	7
2.2	Microrredes energéticas P2P	8
2.3	Contextualização do mercado das microrredes energéticas P2P	10
2.3.1	Perspetiva socio-económica	10
2.3.2	Perspetiva regulamentar	12
2.3.3	Perspetiva operacional	13
2.3.4	Visão global dos projetos em desenvolvimento	15
2.4	Introdução da tecnologia <i>blockchain</i>	17
2.4.1	Identificação dos princípios fundamentais	17
2.4.2	Taxonomias da arquitetura dos sistemas em <i>blockchain</i>	19
2.4.3	Métodos de consenso	20
2.5	Microrredes energéticas P2P suportadas pela <i>blockchain</i>	24
3	Formulação da ferramenta de avaliação de uma microrrede energética P2P	29
3.1	Enquadramento do negócio	29
3.2	Componentes da microrrede	30
3.2.1	<i>Hardware</i>	30
3.2.2	<i>Software</i>	32
3.2.3	Comunicação entre hardware e software	34
3.3	Troca de Informação	35
3.4	Funcionamento do mercado	36
3.4.1	Mecanismo de mercado	36
3.4.2	Mecanismo de definição de preço	36

3.5	Regulamentação	37
3.6	Ferramenta de avaliação de uma microrede	38
4	Análise dos Casos de Estudo	41
4.1	Metodologia de análise dos casos de estudo	41
4.2	Caso de Estudo 1: Projeto da microrede em Brooklyn	41
4.2.1	Camada física	42
4.2.2	Camada virtual	44
4.3	Avaliação do Caso de Estudo 1	48
4.3.1	Enquadramento do negócio	48
4.3.2	Componentes da microrede	48
4.3.3	Troca de Informação	51
4.3.4	Funcionamento do mercado	51
4.3.5	Regulamentação	52
4.3.6	Aplicação da ferramenta de avaliação	53
4.3.7	Análise SWOT	56
4.4	Caso de estudo 2: Projeto da Power Ledger e BCPG	58
4.4.1	Camada física	58
4.4.2	Camada virtual	59
4.5	Avaliação do Caso de Estudo 2	62
4.5.1	Enquadramento do negócio	62
4.5.2	Componentes da microrede	64
4.5.3	Comunicação entre <i>Software</i> e <i>Hardware</i>	66
4.5.4	Troca de Informação	66
4.5.5	Funcionamento do mercado	66
4.5.6	Regulamentação	67
4.5.7	Aplicação da ferramenta de avaliação	68
4.5.8	Análise SWOT	68
5	Discussão de resultados	73
6	Conclusão	77
6.0.1	Contribuições	78
	Bibliografia	79

LISTA DE FIGURAS

2.1	Exemplo de uma microrede fotovoltaica residencial	9
2.2	Representação do processo de realização de uma transação na <i>blockchain</i> . .	18
2.3	Representação do trilema da energia	27
3.1	Representação da comunicação entre o hardware e o software	34
4.1	Componentes da camada física da MRB	43
4.2	Interação entre o software na Exergy	44
4.3	Representação do funcionamento do mercado local da MRB	45
4.4	Exemplificação do mecanismo de mercado da MRB	47
4.5	Representação do funcionamento do negócio	60
4.6	Representação da divisão da plataforma de mercado por níveis	61

LISTA DE TABELAS

2.1	Identificação dos desafios operacionais ao desenvolvimento de microrredes	14
2.2	Taxonomia da arquitetura dos sistemas em <i>blockchain</i> [110]	19
3.1	Ferramenta de avaliação do enquadramento do negócio	30
3.2	Ferramenta de avaliação dos componentes da microrrede	35
3.3	Ferramenta de avaliação da troca de informação	36
3.4	Ferramenta de avaliação do funcionamento de mercado	37
3.5	Ferramenta de avaliação da regulamentação	38
3.6	Representação final da ferramenta de avaliação de uma microrrede	39
4.1	Aplicação da ferramenta de avaliação à MRB	54
4.2	Análise SWOT da MRB	55
4.3	Aplicação da ferramenta de avaliação à microrrede da T77	69
4.4	Análise SWOT da microrrede da T77	70
5.1	Comparação entre sistemas energéticos	75

SIGLAS

DPoS Delegated Proof-of-Stake

FER Fontes de energia renovável

IoT Internet of Things

MRB Microrede de Brooklyn

P2P Peer-to-Peer

PoAu Proof-of-Authority

PoB Proof-of-Burn

PoC Proof-of-capacity

PoS Proof-of-Stake

PoW Proof-of-Work

SCVM Sistema de gestão de ofertas de compra e venda de energia do mercado

*

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

1.1.1 Energia fotovoltaica

As energias renováveis estão a transformar-se na principal fonte de abastecimento de energia, tanto a nível do consumo comercial como do consumo doméstico. Nos últimos anos, em Portugal, foi feito um investimento enorme no desenvolvimento das fontes de energia renovável (FER), incentivado pela privatização, pelos incentivos financeiros públicos e pelas iniciativas políticas energéticas. Em 2016, a produção renovável abasteceu 56 % do consumo elétrico nacional, face aos 47 % registados no ano interior. Na produção hídrica, que abasteceu 28 % do consumo, registaram-se condições excecionais e a produção eólica ficou em linha com o regime médio, abastecendo 22 % do consumo. A biomassa abasteceu 5% do consumo e a energia solar representa cerca de 1.4% [86].

Apesar de Portugal ser um dos países europeus com maior exposição solar, a instalação de painéis fotovoltaicos tem crescido a baixo ritmo. Em 2017 foram instalados cerca de 64 MW de sistemas fotovoltaicos, aumentando a capacidade total para 584 MW no fim de 2017, o que corresponde a um aumento de 1,4% para 1.7% ao fim de um ano [12].

A União Europeia (UE) lançou uma diretiva que estabeleceu como meta para 2030 que do consumo energético geral, 32% terá de ser produzido através de fontes de energia renováveis (FER). Para atingir esta meta, a UE necessita de aumentar a aplicação de renováveis no setor energético e uma parte significativa desta parcela virá da instalação de painéis fotovoltaicos. A UE precisará de aumentar o uso de produção de renováveis no setor energético cerca de 65%, com a contribuição da energia solar a estar na ordem dos 440 Tw/ano. Isto poderá implicar a instalação de milhões de painéis fotovoltaicos na Europa [5].

A instalação de painéis fotovoltaicos pode ser realizada a nível comercial e em grande

escala pelas empresas de energia, ou pode ser instalada em contexto privado, na residência privada de cada indivíduo.

A instalação fotovoltaica em grande escala implica custos de infraestrutura muito grandes, porque além da própria instalação de produção e conversão de energia solar, esta necessita de espaços com áreas muito grandes disponíveis e espaços deste tipo só existem fora das grandes cidades. Portanto, também é necessária a construção de rede de distribuição que transporte a energia desde a instalação até ao local de consumo. Além dos custos, como a electricidade tem de percorrer grandes distâncias até ao ponto de consumo, muita desta é dissipada. Considerando os custos e o desperdício, esta não parece uma alternativa eficiente produção e distribuição de energia.

A instalação de painéis fotovoltaicos nos telhados das residências das grandes cidade pode evitar os elevados custos de instalação, no sentido em que, cada painel pode ser ligado ao sistema de distribuição já existente. E como a energia está muito mais perto do local de consumo, a quantidade de energia dissipada no processo de transporte reduz drasticamente, tornando o processo geral de produção e distribuição de energia muito mais eficiente.

Existem dois fatores que definem o aproveitamento da energia solar: a intermitência da produção e a variabilidade do consumo.

Como a energia solar é um bem que depende de um recurso que não é possível controlar, a exposição solar, a produção depende inteiramente das condições atmosféricas diárias. Se durante a manhã houver sol mas durante a tarde não, só será produzida energia solar na parte da manhã. Nas horas em que a exposição solar é maior, a produção energética é muito maior.

A variabilidade de consumo está relacionada com os padrões de consumo de cada consumidor. Por exemplo, existem consumidores que durante a parte da manhã realizam um maior consumo energético, enquanto outros atingem picos de consumo durante a tarde ou noite.

A correspondência entre a produção do painel e o consumo do dono do painel é uma tarefa difícil que as empresas do setor energético investigaram e tentaram resolver. Uma das resoluções para este problema foi o desenvolvimento da economia de partilha no mercado energético, em que a produção em excesso de um painel fotovoltaico residencial pode ser distribuída por consumidores que vivem perto da instalação fotovoltaica, ou seja, os vizinhos do dono do equipamento. Assim, em períodos de pico de produção, o excesso de energia em vez de ser dissipado, é vendido ao próximo que necessita.

1.1.2 Economia de partilha no mercado energético

Atualmente, a instalação de painéis fotovoltaicos nos telhados residenciais está a aumentar. Contudo, o excesso de energia produzido nestes painéis é vendido à empresa de energia da região a preço de compra de grossista. Ou seja, as empresas de energia compram esta energia a um preço baixo que depois permite a realização de lucro através da

re-venda desta energia aos utilizadores da rede. O consumidor final, que pode viver ao lado do produtor da energia renovável, tem de realizar um contrato com a empresa de energia e pagar uma mensalidade completa para obter energia gerada pelo seu vizinho. E muitas vezes, devido às condições dos canais de distribuição e às distâncias entre produtor e consumidor, essa energia é desperdiçada durante o transporte.

Este modelo de negócio veio resolver o problema da correspondência entre a intermitência da produção e a variabilidade do consumo. Contudo, levanta-se outro problema: a centralização do mercado energético.

Enquanto o desenvolvimento das FER veio permitir a produção de energia própria de cada indivíduo, o fato da energia ter de ser controlada pela empresa de energia local não permite o aproveitamento independente e total da energia fotovoltaica produzida por cada um.

O processo, como é feito atualmente, é centralizado e controlado por uma única entidade, ou seja, esta detém o controlo sobre a produção, consumo e os preços praticados. Além disso, o modelo de negócio não é eficiente, visto estar a envolver processos que são desnecessários à troca de energia entre membros da comunidade local. O produtor pode estar a vender energia que voltará a comprar para utilização própria ou pode estar a vender a energia para outra comunidade local que não a sua, cujo transporte causará a dissipação de uma parte.

O mercado energético centralizado atual implica a falta de transparência de informação, o controlo absoluto do mercado, a exclusão do produtor de energia do processo de distribuição e a ineficiência de processos.

No sentido de combater as lacunas do mercado centralizado mencionadas acima, os governos e as empresas do setor energético estão a investir na construção de microrredes autónomas em comunidades locais que permitem a troca de energia P2P(*Peer-to-Peer*).

1.1.3 Introdução das microrredes energéticas

O desenvolvimento e análise de microrredes em *campus* universitários já foi extensamente experimentado mas a sua aplicação em áreas residenciais está numa fase inicial.

A tecnologia por detrás de uma microrrede local tem de permitir o controlo dos bens, tanto tangíveis como intangíveis. A distribuição física de energia pode ser controlada através do desenvolvimento de contadores inteligentes e o controlo virtual do negócio pode ser realizado através de novos *softwares*.

O desenvolvimento da IoT, permite a interoperabilidade entre *hardware* na rede e o registo dos dados a um nível distribuído.

O aparecimento da tecnologia *blockchain* veio permitir a resolução de alguns problemas que impediam o desenvolvimento de microrredes locais descentralizadas, nomeadamente, a fiabilidade da informação, a segurança, a realização de transações sem recorrer a um terceiro e a manutenção de um registo de produção e consumo desde o início de vida de um kilowatt até ao momento em que este é consumido.

O aumento das FER, juntamente com o desenvolvimento da IoT e da *blockchain* veio iniciar uma tendência no mercado energético que está a desafiar o modelo atual em que uma empresa de energia controla o mercado centralmente. A tendência é o desenvolvimento de microrredes energéticas P2P suportadas pela *blockchain*.

Com a possibilidade de rastrear cada kilowatt/hora de energia produzido através da IoT e realizar transações financeiras com confiança através da *blockchain*, o desenvolvimento de um mercado local em tempo real que permite a troca de energia renovável P2P é executável.

1.2 Objetivo

O objetivo desta dissertação é a criação de uma ferramenta que permita definir o posicionamento das microrredes energéticas P2P no setor energético atual.

Em primeiro lugar, identificarei os desafios operacionais de uma microrrede energética P2P. Com base nos desafios identificados e na literatura existente sobre o tema, determinarei as propriedades-chave tecnológicas e de gestão de uma microrrede energética P2P eficiente. A identificação destas propriedades permitirá a formulação de uma ferramenta de análise e avaliação de microrredes energéticas P2P. A ferramenta será experimentada através da aplicação desta a 2 casos de estudo. Por fim, a utilidade da ferramenta será comprovada através da realização de uma análise SWOT baseada nos resultados da aplicação da ferramenta.

Portanto, no sentido de cumprir o objetivo, proponho as seguintes contribuições:

1. Identificação dos desafios operacionais da implementação de uma microrrede energética P2P;
2. Identificação das propriedades-chave tecnológicas e de gestão de uma microrrede energética P2P eficiente;
3. Criação de uma ferramenta de análise e avaliação de microrredes energéticas P2P;
4. Realização de uma análise SWOT baseada na ferramenta criada, com o objetivo de comprovar a utilidade desta;

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida por 6 capítulos.

No capítulo 1 é feito o enquadramento do tema abordado, é definido o objetivo da dissertação e as contribuições a realizar para o atingir. Este é seguido pelo capítulo 2 em que será feita a revisão da literatura sobre os conceitos aplicados na dissertação.

O capítulo 2 será dividido em três partes:

1. Microredes energéticas P2P;
2. Introdução à tecnologia *blockchain*;
3. Microredes energéticas P2P suportados pela *blockchain*;

No capítulo 3, com base em literatura académica existente, serão identificadas as propriedades chave de uma microrede energética P2P, por fim a formular a ferramenta de avaliação.

De seguida, no capítulo 4 será realizada a aplicação e o teste da ferramenta criada no capítulo 3 a 2 casos práticos de microredes energéticas P2P. A análise de cada caso será realizada da seguinte forma:

1. Apresentação das características da microrede energética P2P em estudo. A apresentação de cada uma das microredes é dividida pela camada física e pela camada virtual.
2. Aplicação da ferramenta de avaliação;
3. Realização da respetiva análise SWOT;

Em seguida à análise, no capítulo 5, será feita uma apreciação crítica aos resultados da aplicação da ferramenta por forma a retirar conclusões sobre a utilidade desta.

Por fim, no capítulo 6 será feita uma apreciação geral da dissertação e a apresentação das conclusões obtidas sobre o posicionamento das empresas avaliadas no caso de estudo.

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Introdução ao mercado energético P2P

Até à data, a energia tem sido principalmente gerada por grandes centrais elétricas alimentadas por combustíveis fósseis não renováveis [69] e por grandes infraestruturas produtoras de energia renovável, tais como, centrais hidroelétricas e centrais geotérmicas. Isto causa uma degradação ambiental e um desperdício no transporte da energia, devido às grandes distâncias entre as centrais geradoras e os locais de consumo [93]. Contudo, com o aumento da criação de FER distribuídas, o tradicional consumidor de energia poderá tornar-se também produtor, consumindo e gerando energia. A geração de energia através de FER é imprevisível e intermitente, e os produtores-consumidores que produzem energia em excesso podem vender o excedente a outros consumidores. Estas trocas de energia entre produtores-consumidores e consumidores é chamada de troca de energia P2P [108] e dá origem à criação microrredes locais de geração de energia.

As microrredes promovem a troca ativa de energia produzida localmente entre os membros da comunidade, praticamente em tempo real [60]. Estas facilitam um balanço sustentável, fiável e local de geração e consumo de energia e, do ponto de vista económico, representam uma opção viável para a integração de FER no sistema energético atual [51]. Uma microrrede ajuda a desenvolver comunidades auto-sustentáveis, incentiva o investimento e fortalece consumidores e produtores-consumidores de pequena escala [20]. A implementação de um sistema em microrrede implica sistemas de informação inovadores, seguros e inteligentes [90] que permitam o funcionamento de um mercado descentralizado em que haja confiança entre os membros. Assim, este é um domínio em que os sistemas em rede suportados pela tecnologia *blockchain* se encaixariam naturalmente, permitindo as trocas de energia diretas entre consumidores de energia [6]. A *blockchain* permitirá aos consumidores participar na decisão de quem será o produtor da sua energia

e, conseqüentemente, selecionar a forma como esta será gerada.

2.2 Microredes energéticas P2P

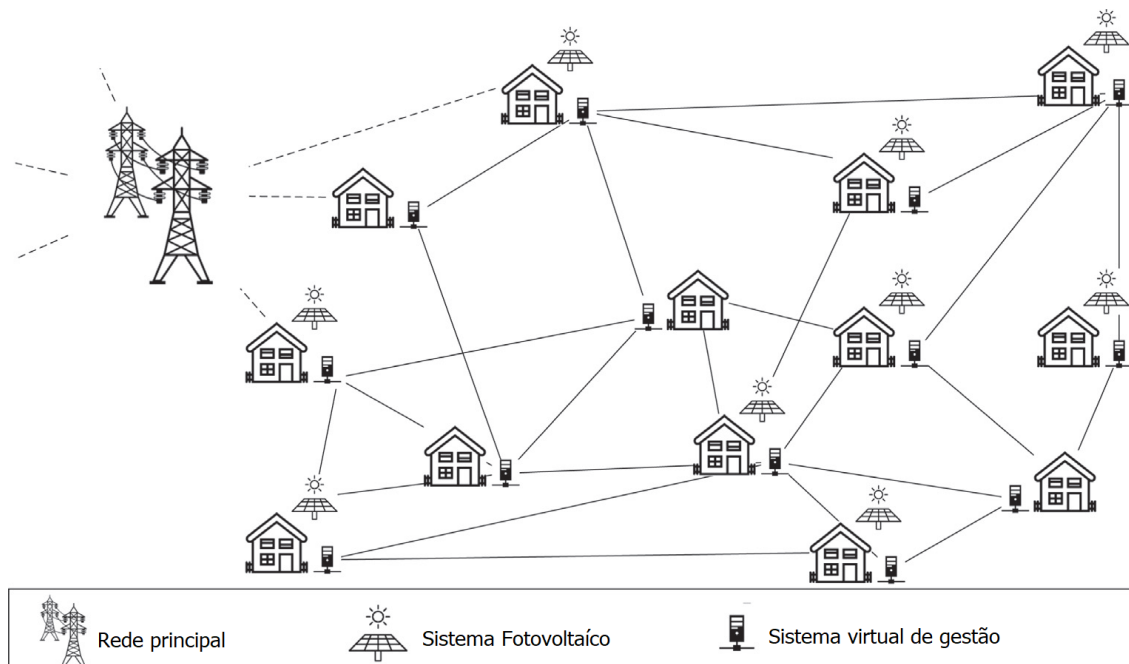
A sustentabilidade e a eficiência do uso dos recursos naturais do nosso planeta estão intrinsecamente ligadas à utilização de FER descentralizadas. As FER utilizam o potencial da luz solar, do vento, da água, dos recursos geotermiais e das forças gravitacionais [23]. A integração eficiente de FER e a reestruturação do sistema energético atual em várias microredes interconectadas entre si, podem melhorar a fiabilidade e a sustentabilidade ambiental do mercado energético e, ao mesmo tempo, criar novas oportunidades económicas [65].

Os sistemas energéticos tradicionais podem ser caracterizados por um grande número de consumidores espalhados por uma grande área, como por exemplo, um país [4]. A energia é fornecida por grandes centrais elétricas através de um mecanismo de coordenação centralizado. Os sistemas de energia descentralizados são o oposto destes sistemas centralizados, já que são constituídos por geradores de energia de pequena escala colocados na mesma área com um ponto limite de consumo de energia e são utilizados por um pequeno número de pessoas [4]. Uma microrede é um grupo de múltiplas unidades de geração de energia distribuídas e armazenadores de energia a funcionarem em conjunto e coordenadamente. Este sistema está ligado à rede elétrica principal num ponto específico, tipicamente a nível da distribuição, e pode funcionar em paralelo com a rede principal ou em modo ilha [84]. A maioria das microredes futuras funcionarão através da ligação à rede principal. Por forma a atingir funcionamento em modo ilha a longo prazo, a rede tem de satisfazer elevados parâmetros de armazenamento e capacidade para conseguir fornecer continuamente a procura flexível dos consumidores [36].

Na Figura 2.1 está um exemplo de uma microrede residencial de energia fotovoltaica, com consumidores e produtores-consumidores. De notar que os participantes da rede não necessitam de estar fisicamente conectados entre todos. As microredes virtuais são o controlo agregado de vários produtores, produtores-consumidores e consumidores de energia numa comunidade virtual. Expandir uma microrede física por forma a incluir novos participantes virtuais, aumentará exponencialmente as receitas desta.

As microredes promovem o consumo de energia no momento mais próximo do instante em que esta foi gerada, contribuindo para a sustentabilidade do sistema e para o eficiente uso dos recursos. Os mercados em microrede podem reduzir a necessidade de sistemas de transporte de energia ineficientes e caros que causam perdas substanciais [42], satisfazendo a procura através da utilização de recursos energéticos locais. Além disso, a frequência de problemas de congestão e distribuição pode diminuir [53]. Ainda, os mercados em microrede trazem uma nova classe de ativos aos membros de uma comunidade e um acesso direto à energia gerada pelos vizinhos, o que conseqüentemente, inclui este mercado na recentemente emergente economia de partilha [78].

Figura 2.1: Exemplo de uma microrede fotovoltaica residencial



A principal diferença entre uma microrede e uma rede passiva e centralizada alimentada por microgeradores locais reside na forma como esta é gerida e como a utilização dos recursos é coordenada. Uma grande vantagem do conceito de microrede comparativamente à instalação de microgeradores por parte de um agente central, reside na possibilidade dos conflitos de interesse influenciarem todos os *stakeholders*, portanto, as decisões operacionais a serem tomadas têm de partir de um consenso global entre todos os membros envolvidos [36].

Os mercados elétricos estão a passar por uma transição de um monopólio regularizado para um mercado descentralizado, mas até hoje, o mercado é dominado pelos grandes retalhistas de energia que compram aos produtores e a distribuem pelos clientes. Nunca tiveram de lidar com quantidades significantes de energia produzida pelos seus clientes. Até ao aparecimento dos contadores inteligentes, nem os retalhistas nem os clientes tiveram a possibilidade de determinar os consumos energéticos dos clientes em determinados instantes, e como os fornecedores não podem cobrar o uso de energia em escalas temporais mais exatas do que as leituras dos contadores, não há a possibilidade de cobrar aos consumidores os preços que refletem os custos em tempo real da eletricidade [44]. O aumento do desenvolvimento de recursos de produção e controlo energético está a desafiar o controlo e a fiabilidade do regime centralizado de produção de energia [47].

FER próprias suportadas por contadores inteligentes, por si só, não vão ser o suficiente para alinhar a variabilidade da produção de energia renovável com os padrões de consumo de uma sociedade moderna industrial [47]. Por exemplo, em áreas com grande disponibilidade de exploração hidroelétrica, estas variáveis podem ser coordenadas através da combinação da exploração hidroelétrica com a disponibilidade de outras **FER**.

Outros casos, implicarão grandes investimentos em equipamento de armazenamento de energia e possivelmente, no aumento da capacidade de transmissão de energia.

2.3 Contextualização do mercado das microrredes energéticas P2P

2.3.1 Perspetiva socio-económica

A contextualização das microrredes passa pela análise do impacto económico que estas têm nas comunidades locais e nos mercados energéticos atuais.

Em [27] são referidos os principais benefícios económicos das microrredes:

- A produção a nível local juntamente com um sistema de baterias pode ser utilizada para evitar preços mais altos indicadores de pouca oferta e muita procura;
- A venda do excesso de energia produzido a nível das FER locais traz um aumento das fontes de receita;
- As melhorias na fiabilidade obtidas através do funcionamento de uma microrrede em modo ilha podem ser muito valiosas;

Em [11], é discutido que as microrredes, além de comunidades rurais, podem servir eficientemente grandes centros urbanos e funcionar como impulsionadoras de eficiência no planeamento geográfico e na gestão de recursos municipais.

Em [109], conclui-se que à medida que as FER se forem desenvolvendo e melhorando, a aplicação de microrredes distribuídas será mais valorizada. Quando o custos iniciais e de operação das FER baixarem devido à produção em massa e à inovação tecnológica, a construção de microrredes tornar-se-á uma opção viável e contribuirá para a redução dos custos energéticos totais [111].

A criação de subsídios de incentivo por parte dos governos para o investimento inicial e o apoio às empresas que criam a tecnologia para implementação também aumentam o benefício económico de uma microrrede [66].

Com o aumento dos desastres provocados pelas alterações climáticas, a implementação de microrredes é uma oportunidade de os governos garantirem fiabilidade energética e se preparem no caso de paragem de funcionamento da rede de produção e distribuição principal[1].

Franke [28] analisa a eficiência económica e ecológica de microrredes P2P de energia, em que uma das principais conclusões foi de que esta combinação tem potencial para causar uma redução na conta da luz dos consumidores.

Segundo [31], um sistema económico eficiente exige que os participantes que criam um benefício para outros, sejam compensados por isso. A fonte de receita extra proveniente da venda do excesso de energia pode encorajar mais consumidores a adotar equipamento e mecanismos que permitam a troca de energia P2P.

As microrredes têm vindo a tornar-se um tópico muito falado nos ambientes políticos e são consideradas uma resposta para muitos problemas, tais como, o consumo energético excessivo, picos na procura de energia e a implementação da FER. Contudo, as alterações institucionais necessárias para tornar as microrredes uma realidade, ainda não foram tomadas. Por um lado, existe uma grande expectativa, mas por outro, ainda existe uma grande falta de preparação institucional para a implementação de microrredes.

Em [1], refere-se que as expectativas no que diz respeito a microrredes não são realísticas. A crença de que a implementação de microrredes diminuirá o valor das contas de energia não pode ser garantida. Expectativas irrealistas podem levar ao fracasso da implementação desta tecnologia.

Com o aumento das unidades de produção de energia renovável, o custo de conexão à rede principal também pode ser uma barreira à implementação de microrredes. De acordo com este estudo, a extensão da rede de distribuição a zonas rurais em países desenvolvidos custa entre 7200€ a 9000€ por quilómetro mais os custos de material que podem acrescer 7000€. Não existe regulamentação clara sobre a extensão da rede principal a zonas remotas para a aplicação de microrredes, ou seja, não existe uma entidade pré-definida responsável pela conexão entre a rede principal e a microrrede [5].

Além dos impactos económicos, é importante caracterizar a aceitação social da implementação de uma microrrede residencial.

A aceitação pública da geração de energia renovável local ao invés de nacional é discutida no estudo experimental de Bertsch [8]. O estudo foi realizado na Alemanha, através da colocação de inquéritos. Em termos gerais, o cidadão alemão é a favor da descarbonização e suporta a criação de microrredes locais desde que se mantenha o nível de fornecimento. A privacidade e a mudança da paisagem local são um dos principais fatores de não aceitação.

O estudo [89] mostra que as microrredes energéticas necessitam de uma aceitação social mais intrusiva, quando comparadas com a tradicional grande infraestrutura de produção instalada longe das populações. Os participantes têm de aceitar as mudanças tecnológicas no interior das suas habitações. Esta aceitação é pública e privada, e pode obrigar a mudanças nos consumos devido a uma partilha de informação maior.

Segundo [1], os inovadores no campo das microrredes representam um grupo particular de consumidores com elevados rendimentos e altos níveis de consciência ambiental. Este tipo de consumidor está em contraste com o consumidor médio, que tem pouco conhecimento sobre a tecnologia e tem uma atitude de "esperar para ver" em relação ao investimento. Este tipo de consumidor vai esperar que se desencadeie uma iniciativa do governo ou da indústria tradicional.

A perceção de que as tecnologias que suportam uma microrrede são imaturas também é uma barreira à troca energética através das microrredes [103].

A aceitação social das microrredes depende muito da forma como estas virão a ser promovidas. Se as empresas de energia tradicionais de cada região decidirem realizar campanhas de promoção a incentivar a instalação de microrredes, a aceitação social destas

será muito maior. Contudo, isto pode implicar que a microrede não seja efetivamente descentralizada, e que a empresa de energia continue a controlar o fornecimento de energia [104].

O aumento da aceitação social de mercados energéticos em microrede pode ser atin- gida através do desenvolvimento, por parte de entidades governamentais, de uma inici- ativa de partilha da visão, objetivos e operação de uma microrede [40]. Contudo, estas entidades, podem estar sobre a influência do poder das grandes empresas de energia.

2.3.2 Perspectiva regulamentar

Apesar do crescimento do interesse no desenvolvimento de microrredes, ainda não existem políticas, normas ou regulamentos associados às repercussões da integração entre as microrredes e os sistemas tradicionais de distribuição[46].

Na ausência de políticas claras e entidades regulamentares associadas à implementa- ção de microrredes, é improvável que estes sistemas se desenvolvam [62].

No sentido de incentivar esta tecnologia, existe a necessidade de criar regulamentação que suporte a integração das FER no sistema de distribuição tradicional, permitindo a segurança no fornecimento e competição económica [82].

Contudo, segundo [5], os Estados Unidos da América, a Europa e a China formularam e promulgaram diversas políticas e regulamentos de forma a incentivar e a beneficiar a exploração e a utilização de FER e de tecnologias que as suportam. Cada uma das regiões desenvolveu os seus próprios planos e alvos para estimular a penetração da energia reno- vável no mercado energético e para ultrapassar barreiras financeiras e económicas, tais como, empréstimos e subsídios. No entanto, após fornecer os fundos e os incentivos para o desenvolvimento máximo das microrredes, novos desafios surgem, tais como, as políticas de cada país e a regulamentação aplicada em cada membro de cada região.

O planeamento da distribuição e transporte de energia é um processo regulado, em que se rege as condições de fluxo de energia e a capacidade dos canais de transporte [29]. Um projeto não pode começar sem que exista um planeamento da transmissão da energia. O acesso à rede principal por parte das FER é um problema porque existem múltiplas fontes de geração de energia, fluxos de energia bidirecionais e coordenação e gestão de fluxos [43].

A escolha do local de instalação e do design das FER também é uma característica regulamentada e que se pode apresentar como uma barreira ao desenvolvimento de mi- croredes. A regulamentação visa a preservação de habitats de fauna e flora, de fontes de recursos hídricos e recursos culturais, como por exemplo, áreas de importância histórica ou etnográfica. Ainda, a construção de explorações de energia renovável em grande escala pode implicar a ocupação de áreas extensas, que poderiam ser utilizadas para outras ati- vidades económicas, como a agricultura. Assim, deve ser feito um planeamento eficiente e regulamentado da instalação de microrredes [63].

2.3.3 Perspetiva operacional

Sistemas energéticos locais e descentralizados precisam de ultrapassar grandes obstáculos, tais como, ter capacidade para controlar um grande número de agentes independentes e com interesses próprios, controlar a energia consumida e produzida em diferentes pontos da microrede e a coordenar a relação entre múltiplas FER e o sistema energético central de forma a que a procura e a oferta estejam balanceadas em todos os momentos [49].

No caso de microredes em funcionamento em modo ilha, quando as únicas fontes de energia são as FER locais, o principal desafio operacional é gerir o sistema de forma a manter o funcionamento da microrede. A limitação da geração de energia através da gestão da procura dos consumidores é uma forma de manter o funcionamento da microrede em modo ilha [97].

Também é importante definir uma estratégia de controlo que permita alternar, entre o modo de funcionamento conectado à rede principal e o modo ilha. Deve ser instalado um 'interruptor' ao nível dos pontos de conexão entre a microrede e o sistema de distribuição principal que permita esta alternância entre modos [97].

Ao nível da conexão entre as microredes e o sistema de distribuição principal, surge o problema de fluxos energéticos em direções opostas. Os operadores de distribuição não aceitam a exportação da energia da microrede para o sistema de distribuição se o processo não for regulado e se não houver garantia de comprador de energia. Se as microredes não puderem exportar energia para o sistema de distribuição principal, estas perdem a habilidade de trocas energéticas P2P [88].

Um dos principais desafios operacionais de uma microrede conectada ao sistema de distribuição principal, é o controlo da voltagem e da frequência na rede [106]. O operador de distribuição necessita de manter um certo nível de frequência e voltagem na rede, de forma a manter um fluxo de energia estável a todos os consumidores. Contudo, como a produção de energia através das FER é potencialmente intermitente, a tarefa de controlo da voltagem e da frequência na rede complica-se [82].

À medida que os mercados se tornam cada vez mais descentralizados, a intermitência também começa a ser um desafio operacional cada vez maior nas microredes. A geração distribuída implica a formação de fluxos bidireccionais em sistemas de distribuição que foram estruturados a só transportarem fluxos unidireccionais. Fluxos excessivos na direção contrária podem causar flutuações na voltagem que afetam a operabilidade de aparelhos na rede e testam os limites físicos da rede [21]. As estratégias tradicionais que permitem resolver o problema de geração distribuída excessiva podem ser a construção de mais rede de distribuição ou limitar a exportação da energia das microredes. Estas estratégias implicam custos de infraestrutura e vão contra os interesses dos produtores consumidores que em vez de exportarem menos, querem aumentar a quantidade de excesso de energia vendida [97].

Devido ao fato de a produção de energia renovável só poder ser realizada quando há

condições para tal, tais como, elevada exposição solar ou velocidade do vento, podem existir tempos do dia em que não há geração de energia e os participantes da microrrede terão de confiar em outras fontes de energia [88]. Além do mais, a variabilidade da energia renovável também cria problemas à segurança do sistema energético. Grandes e rápidas variações na produção devido à flutuação nas condições ambientais podem interferir com a frequência do sistema energético. A frequência é determinada pelo balanço entre procura e oferta no sistema, e se em qualquer momento, existe um pico de energia renovável produzida, o sistema será afetado [100].

Outro desafio à implementação das microrredes é a desvalorização da energia. Primeiro, como a produção de energia renovável não pode ser 'desligada', a energia é produzida sempre que há sol ou vento, por exemplo. Segundo, como o custo variável da energia renovável é 0, a energia renovável é a primeira a ser vendida na rede. A consequência destes dois fatos é que à medida que as FER comecem a dominar as fontes de produção energética, a produção de energia renovável será tanta que excederá a procura, o que vai causar uma desvalorização no preço da energia [107].

Como a configuração de uma microrrede implica a operabilidade e a interoperabilidade de múltiplos componentes, se estes não forem implementados e conectados com sucesso, podem estar a pôr em causa o bom desempenho operacional do sistema. Curtos circuitos na rede principal que danificam os componentes desta são acontecimentos comuns. Então, tal como nos sistemas tradicionais, as microrredes necessitam de mecanismos de proteção e manutenção, não só contra falhas externas como falhas internas [106].

A maximização operacional da geração de energia numa microrrede foi extensivamente analisada por Pascual [79]. Ainda, com o objetivo de facilitar o balanceamento entre procura e oferta, estão a ser analisados os resultados da conexão entre múltiplas microrredes [13, 79]. Contudo, a investigação da aplicação de microrredes está a apenas numa fase primitiva.

Na tabela 2.1, é possível ver uma síntese dos principais desafios operacionais de uma microrrede em modo ilha e de uma microrrede conectada à rede principal.

Tabela 2.1: Identificação dos desafios operacionais ao desenvolvimento de microrredes

Desafios	Tipo de microrrede	
	Conectada à rede principal	Modo ilha
Intermitência da produção de energia renovável	X	X
Variabilidade da produção de energia renovável	X	X
Interoperabilidade entre componentes	X	X
Proteção da rede	X	X
Controlo da frequência	X	X
Controlo da voltagem	X	X
Fluxos energéticos bidireccionais	X	-
Desvalorização do preço da energia	X	-
Garantir o fornecimento de energia	-	X
Alternância de modo de funcionamento	X	-

2.3.4 Visão global dos projetos em desenvolvimento

No 4º trimestre de 2018, a *Navigant Research* identificou cerca de 2258 projetos, que perfazem 19.575 MW de energia planeada e instalada. Desde o 4º trimestre de 2017, foram iniciados cerca de 241 projetos. A América do norte lidera o mercado das microredes em termos de capacidade elétrica total, seguida pela região da Ásia-pacífico, depois Europa e por fim, o Médio Oriente e África.

De acordo com o relatório da *Navigant Research* [71], as microredes remotas representam cerca de 40 % da capacidade global de microredes, com um total de 7604 MW. O seguinte maior setor de aplicação desta tecnologia é o industrial e, por fim, o residencial.

A União Europeia criou um projeto de financiamento, Horizon 2020, dedicado ao desenvolvimento de novas tecnologias, com um fundo de 77 mil milhões de euros. Até hoje a *Innovation and Networks Executive Agency* (INEA) assinou um acordo com a União Europeia para o desenvolvimento de 14 projetos em microredes energéticas inteligentes [5].

A nível global, existem um conjunto de projetos que estão a liderar o mercado das microredes de trocas energéticas P2P.

No Reino Unido, foi criado o Piclo. O Piclo é uma plataforma online que permite trocas energéticas P2P entre produtores e consumidores comerciais. A plataforma utiliza um algoritmo para alocar a geração local ao consumo. A informação dos contadores inteligentes e as preferências dos consumidores são utilizadas para realizar a correspondência entre a procura e a oferta. Os produtores têm controlo e visibilidade sobre quem compra a energia. Os consumidores podem escolher a quem querem comprar energia, ou seja, podem escolher a fonte de produção [108].

A Vandebon é uma plataforma online criada na Holanda em que os consumidores podem comprar energia diretamente dos produtores independentes, como por exemplo, agricultores com turbinas de vento [78].

Na Alemanha, a *SonnenBatterie*, uma empresa de produção de baterias, desenvolveu a *Sonnen Community* [70]. Os participantes do projeto são os donos das baterias da *SonnenBatterie* que partilham energia entre si a tarifas determinadas dentro da comunidade. Com recurso a painéis fotovoltaicos e a um sistema de baterias, os participantes conseguem manter o seu próprio fornecimento e até mesmo produzir em excesso nos dias de sol. A energia em excesso, em vez de ser introduzida na rede principal, é armazenada nas baterias e utilizada quando não existem condições ambientais para a produção de energia renovável. A ideia é similar à do Piclo e à da Vandebon, contudo, a *Sonnen Community* destaca a importância de um sistema de armazenamento de energia.

Também na Alemanha, foi desenvolvido um projeto chamado *Peer Energy Cloud*, em que se criou um sistema de mercado em *cloud* que permitia as trocas de energia local. Este projeto foi lançado com o objetivo de investigar novas formas de registo de informação e testar procedimentos de previsão que permitam o estabelecimento de uma microrede [14].

Nos últimos anos foi possível notar uma tendência de crescimento na aplicação da tecnologia *blockchain* aos mercados e operações energéticas.

Muitas empresas do setor energético estão a investir na investigação e estão ativamente envolvidos em projetos baseados em *blockchain*. As primeiras transações energéticas baseadas em *blockchain* ocorreram em 2014. Em Março de 2018, 122 empresas do setor estavam envolvidas na tecnologia e 40 delas apresentaram projetos já planeados. Entre o segundo trimestre de 2017 e o primeiro trimestre de 2018, uma combinação entre fundos de investimento e fundos provenientes de ICO's (*Initial Coin Offerings*) perfizeram um investimento de 240 milhões em projetos energéticos baseados em *blockchain*. Existem projetos dedicados aos mercados retalhistas de energia, a microrredes energéticas P2P, ao desenvolvimento do processo de carregamento de veículos elétricos e à garantia de segurança na rede [64].

Um estudo recente determinou que 57% dos fundos reunidos para o investimento em projetos baseados em *blockchain*, foi para projetos que utilizam a *blockchain* para verificar e executar transações P2P [64].

Incluído nesta categoria está o projeto da microrrede de Brooklyn (MRB) desenvolvido pela empresa americana LO3 Energy, que permite aos participantes a troca de energia através da realização de contratos inteligentes na *blockchain* [32]. Atualmente, a MRB tem cerca de 60 produtores-consumidores e 500 consumidores. A MRB será estudada em maior detalhe no capítulo 4. A LO3 Energy também está a aplicar a sua tecnologia a dois projetos na Alemanha, um na cidade de Landau e outro na cidade de Allgau .

Na Áustria, as empresas de energia *Verbund* e *Salzburg AG* desenvolveram um projeto experimental que permitia a troca de energia produzida nos telhados das residências domésticas locais através de uma *App* baseada em *blockchain* [64].

Outro exemplo deste tipo é o *Jouliette*, um projeto desenvolvido na Holanda numa parceria entre o operador de distribuição *Alliander* e a empresa *Spectral*, uma empresa que desenvolve soluções energéticas. A microrrede contém 16 edifícios, painéis fotovoltaicos e uma microrrede física [30].

Na região da Ásia-Pacífico, existe uma empresa australiana que também já desenvolveu múltiplos projetos de microrredes baseadas em *blockchain*. A empresa chama-se *Power Ledger*, e em conjunto com o município da cidade de Fremantle e a Universidade de Curtin desenvolveram uma microrrede em que se transaciona o excesso de energia produzido a nível de painéis fotovoltaicos residenciais e a nível do calor dissipado por equipamentos [32]. Além deste projeto, também desenvolveram em conjunto com a BCPG, uma empresa tailandesa, uma microrrede em Banguecoque que será estudada em maior detalhe no capítulo 4.

O potencial da tecnologia *blockchain* para aplicação nos mercados energéticos P2P ainda é incerto, mas novos projetos continuam a ser desenvolvidos no setor.

2.4 Introdução da tecnologia *blockchain*

Após a revisão da literatura sobre os projetos em desenvolvimento globalmente, foi possível constatar a crescente tendência da aplicação da tecnologia *blockchain* às microrredes energéticas P2P. Assim, decidi realizar a análise e discussão de microrredes energéticas suportadas por esta tecnologia.

De forma a poder realizar uma análise e discussão concisa e completa, considere importante a realização de um estudo à tecnologia *blockchain*.

2.4.1 Identificação dos princípios fundamentais

A tecnologia *blockchain* é principalmente reconhecida pela sua aplicação na conceção da criptomoeda *Bitcoin* e funciona como um livro-razão público e digital de toda a informação relativa a transações [105]. O livro-razão pode armazenar transações digitais, informação e valores tangíveis que agregados formam blocos com uma marca temporal e criptograficamente conectados a blocos anteriores, formando uma corrente de blocos (cuja tradução em inglês é *blockchain*) que determina a ordem sequencial de eventos no sistema [6].

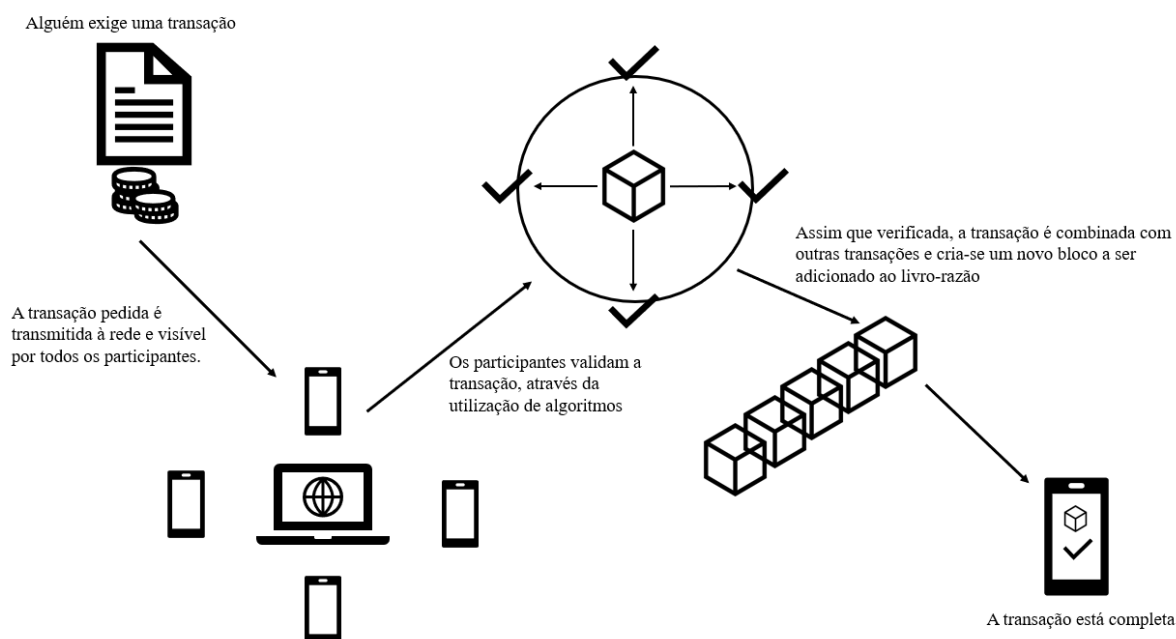
Segundo [61], o funcionamento da *blockchain* processa-se da seguinte forma:

1. Um utilizador desencadeia uma transação, criando nova informação que é introduzida na rede;
2. O destinatário da transação verifica a informação. Se esta estiver correta, a informação é transmitida à rede;
3. Todos os participantes (*nodes*) na rede executam um algoritmo de consenso no bloco.
4. Depois de executado o algoritmo de consenso, se verificado com sucesso, o bloco será armazenado na corrente. Assim, é garantido que a introdução deste bloco é aprovada por todos os participantes da rede.

Na figura 2.2 é possível observar a representação esquemática do processo de realização de uma transação na *blockchain*.

Cada bloco necessita de uma assinatura única. Esta assinatura é criada através de uma função criptográfica cujo output é um *hash*. Esta função criptográfica pode receber qualquer tipo de input e transforma-o numa identificação com 64 dígitos. A função criptográfica mais utilizada nesta tecnologia é a SHA256, que é um dos algoritmos que faz parte da família de funções criptográficas SHA (*Secure hash algorithms*)[101].

O principal desafio é assegurar que as criptomoedas só sejam utilizadas uma vez, ou seja, eliminar a possibilidade de gastar as mesmas moedas duas vezes (gasto duplo). O criador da *Bitcoin*, Satoshi Nakamoto, usou uma rede distribuída P2P e mecanismos criptográficos para criar um método de consenso, resolvendo o problema do gasto duplo. Na *blockchain* da *Bitcoin*, a rede regista a primeira transação em que o dono gasta uma

Figura 2.2: Representação do processo de realização de uma transação na *blockchain*

quantidade particular de moedas e rejeita gastos subsequentes da moeda, eliminando o gasto duplo [99]. A solução passa por uma marca temporal ao momento de criação *hash* do bloco. Quando o *hash* é publicado na rede, a marca temporal prova que a informação existiu naquele momento. Cada *hash* contém a sua própria marca temporal. [75].

Portanto, geralmente, um bloco contém o conjunto de informação das transações cuja assinatura digital é o *hash* do bloco atual, a marca temporal do bloco atual e o *hash* do bloco anterior, que contém a marca temporal do bloco anterior reforçando a fiabilidade no fluxo de acontecimentos da rede.

Através da *blockchain*, é possível o armazenamento de dados distribuído em que cada participante desta tem acesso a toda a base de dados e ao histórico completo de todas as transações. Não existe um participante central que controla o fluxo e armazenamento da informação. Todos os participantes podem verificar os registos anteriores de outros participantes, sem terem de recorrer a um intermediário[39].

A comunicação ocorre diretamente P2P, em vez de através de um participante central. Cada utilizador armazena e reencaminha a informação para os restantes utilizadores.

Outra das principais características desta tecnologia que permite que haja integridade e confiança no sistema é a irreversibilidade de registos. Assim que uma transação é realizada na *blockchain* e as contas dos utilizadores são atualizadas, os registos não podem ser alterados porque eles estão ligados a qualquer registo de transação que os tenha precedido. Vários algoritmos computacionais e estratégias estão a ser aplicados com o objetivo de garantir que o registo das transações é feito permanentemente, ordenado cronologicamente e disponível a todos os utilizadores na rede.

A natureza digital do livro-razão significa que as transações em *blockchain* podem ser

associadas a lógica computacional, ou seja, no fundo, podem ser programadas. Portanto, os utilizadores podem programar algoritmos e regras que automaticamente desencadeiam transações entre participantes. Estas regras ou algoritmos funcionam como um contrato inteligente (*smart contract*) que é basicamente software que se executa sozinho. Quando um conjunto de regras ou condições são cumpridas, as transações são desencadeadas automaticamente.

Concluindo, os princípios fundamentais da *blockchain* são os seguintes:

1. Base de dados distribuída;
2. Irreversibilidade dos registos;
3. Lógica computacional que permite a realização de contratos inteligentes;
4. Comunicação P2P;
5. Transparência nas transações;

À medida que a tecnologia se tem vindo a desenvolver, novas funcionalidades têm vindo a ser criadas. A criação do *token* foi uma destas funcionalidades. O *token* permite a representação de um bem dentro do seu ecossistema. Por exemplo, um *token* pode representar um bem, uma participação, um direito de voto mas apenas dentro do seu ambiente nativo.

A utilização mais frequente dos *tokens* é nas ICO's (*Initial Coin Offerings*, no sentido de reunir financiamento externo. Neste caso, um *token* representa uma parte da empresa que é colocada à venda. Se algum investidor comprar o *token* passa a deter uma parte da empresa e pode ganhar dividendos sobre o seu investimento.

2.4.2 Taxonomias da arquitectura dos sistemas em *blockchain*

Um sistema em *blockchain* pode seguir diferentes regras e arquiteturas dependendo da finalidade desejada e da aplicação específica. Os sistemas existentes atualmente podem ser aproximadamente categorizados nas seguintes categorias: públicos, dedicados a consórcios e privados. Na tabela 2.2, apresentam-se as características das várias taxonomias.

Tabela 2.2: Taxonomia da arquitectura dos sistemas em *blockchain* [110]

Propriedade	Blockchain pública	Blockchain para consórcio	Blockchain privada
Determinação do consenso	Todos podem intervir	Grupo pré-seleccionado	Uma organização
Acesso	Pública	Pode ser público ou restrito	Pode ser público ou restrito
Imutabilidade	Praticamente impossível de manipular	Pode ser manipulada	Pode ser manipulada
Eficiência	Baixa	Alta	Alta
Centralizada	Não	Parcialmente	Sim
Processo de consenso	Não necessita de permissão	Necessita de permissão	Necessita de permissão

2.4.2.1 *Blockchain* pública

Na *blockchain* pública, cada um dos utilizadores da rede pode fazer parte do processo de consenso, livrando esta de qualquer interesse individual. O livro-razão é público, logo,

todas as transações estão armazenadas pelos diferentes utilizadores na rede distribuída, o que torna a manipulação de dados quase impossível. Como a determinação de consenso é realizada através de funções criptográficas que exigem elevado poder computacional e que existe um grande número de utilizadores, a eficiência da arquitetura pública é baixa. A rede da *Bitcoin* é um exemplo de uma rede pública que leva cerca 10 minutos no processo de compilar, confirmar transações e transferir bens, o que é mais rápido do que a maior parte dos métodos de pagamento. Acontece que, 10 minutos é demasiado tempo para a IoT, em que os pagamentos são efetuados entre máquinas que interagem continuamente [99]. A rede pública é descentralizada e qualquer um dos utilizadores pode fazer parte do método de consenso, se tiver a capacidade computacional necessária.

2.4.2.2 *Blockchain* para consórcio

Quando a rede é controlada por um conjunto de empresas, organizações ou indivíduos, a determinação do consenso é apenas feita por estas entidades. Estas entidades têm um poder de controlo total sobre a *blockchain*, e se a maioria destas ou a entidade dominante quiserem manipular a informação inserida na rede, podem fazê-lo. Com menos intervenientes no processo de decisão do consenso, a eficiência da rede controlada pelo consórcio é superior à da rede pública. O sistema é parcialmente centralizado e para se participar no processo de consenso, tem de haver uma certificação do candidato que prove que este pode fazer parte. Como exemplo, a *blockchain* para consórcio pode ser muito útil a um conjunto de empresas que fazem parte da mesma cadeia de abastecimento, porque poderá facilitar as transações e manter um livro-razão de todos os movimentos efetuados na rede, o que aumentará a transparência e a fiabilidade entre participantes da cadeia.

2.4.2.3 *Blockchain* privada

Na *blockchain* privada, a tecnologia passa a ser só uma forma de armazenar e tratar a informação totalmente controlada por uma organização que pode determinar o consenso final. Todas as decisões relativamente a acessos e a permissão a consensos, são tomadas pela organização. A eficiência da rede é muito elevada e a organização pode manipular a rede, se for do seu interesse. Este tipo de rede é completamente centralizado.

2.4.3 Métodos de consenso

Tendo em conta que a *blockchain* é distribuída, é necessário encontrar um algoritmo que permita determinar o consenso entre os utilizadores que vai levar ao crescimento e desenvolvimento da rede. Um bloco com um conjunto de transações pode ser gerado por algum utilizador da rede. De seguida, este bloco é proposto aos restantes utilizadores que o avaliam e validam, ou seja, chegam a um consenso sobre o destino deste. Assim que o bloco é aceite, passa a fazer parte da *blockchain* e todos os novos blocos serão posteriormente conectados a este. Chegar a um consenso em que os blocos são aceites num sistema distribuído é desafiante, já que os algoritmos têm de ser resistentes a falhas dos utilizadores,

informação atrasada e corrupta e utilizadores irresponsáveis e mal intencionados. Vários métodos de consenso já foram propostos e podem ser divididos em duas categorias [35], métodos baseados em lotaria e métodos baseados em sistemas de voto. Existem também métodos em que se usam as duas formas de decisão. Alguns dos métodos com maior aplicação atual são explicados nas secções seguintes.

2.4.3.1 *Proof of work(PoW)*

PoW é o método de consenso utilizado para validar as transações de *Bitcoin*. Um utilizador desencadeia uma transação e calcula um valor para o *hash*, que é guardado no cabeçalho do bloco. Além do valor do *hash*, o cabeçalho do bloco contém um campo com um valor que vai sendo ajustado pelos *miners*, com o objetivo de calcular diferentes valores para o *hash*. Cada vez que um novo número é gerado neste campo, o computador tem de processar a função criptográfica e obter um novo cálculo de *hash*. O consenso final requer o cálculo de um *hash* que tenha um valor menor a um valor alvo pré-estabelecido na rede[110]. Os *miners* não têm forma de prever ou influenciar o resultado, então, a única forma de chegar ao valor final é através de tentativa e erro. Assim que houver um esforço computacional que permita satisfazer o PoW, o bloco é adicionado à cadeia e o *miner* responsável é recompensado com *bitcoins*. O bloco não pode ser alterado sem ter de se refazer todo o processo e com a adição de blocos, o trabalho necessário para alterar o bloco inicial inclui alterar todos os blocos que foram adicionados posteriormente. Um ataque ao bloco inicial implicaria um poder computacional que permitisse alterar todos os blocos seguintes, ou seja, quanto menor o número de blocos na rede, mais exposta esta estará a um ataque[75].

Este procedimento requer um grande esforço computacional que necessita de hardware específico e consequentemente um enorme gasto energético. Os *miners* que têm este tipo de hardware e capacidade competem entre si com o objetivo de resolver a função criptográfica que determina o *hash* correto. O esforço computacional aumenta exponencialmente com o aumento do número de blocos a serem validados.

O método PoW tem-se adaptado ao elevado número de utilizadores, contudo, a taxa de aceitação das transações e da adição final de um bloco à cadeia pode não ser aplicável a determinados casos. Geralmente, uma transação de *bitcoin* necessita de 6 confirmações por parte dos *miners* para ser processada [15]. O tempo médio de validação de um bloco é de 10 minutos.

Um dos pontos mais criticados, é que o PoW é responsável por consumir uma grande quantidade de eletricidade. Em conjunto, os *miners* de *Bitcoin* utilizam 100 vezes mais capacidade computacional do que a combinação dos 500 supercomputadores que existem globalmente. Processar e proteger os mais de 3000 milhões de dólares em circulação requer mais de 100 milhões em eletricidade por ano, o que gera enormes emissões de carbono para a atmosfera [91]. Segundo [22], se a rede da *Bitcoin* se continuar a expandir ao ritmo atual, em 2020, pode apresentar um consumo de energia igual ao de um pequeno

país como a Dinamarca. Em alternativa, novos métodos de consenso continuam a ser explorados, nomeadamente, o método de *Proof of Stake (PoS)*.

2.4.3.2 *Proof of stake (PoS)*

O propósito final do PoS, tal como no PoW, é chegar ao consenso final mas a forma como se obtém o resultado é diferente. Neste tipo de algoritmo de consenso, os que desejam ter poder de decisão na cadeia não têm de investir em poder computacional ou em fontes massivas de eletricidade, têm de investir na criptomoeda ou nos *tokens* do sistema. Dito isto, estes utilizadores são *stakeholders* do sistema. O principal fundamento por trás deste método de consenso é o de que utilizadores com mais criptomoeda, têm menos interesse em atacar a rede [110].

Um utilizador com 300 criptomoedas tem três vezes mais possibilidade de ser selecionado do que um utilizador com 100 criptomoedas [18]. Assim que o selecionado cria o bloco, este bloco ainda tem de ser proposto à *blockchain* e existem vários formatos de PoS que têm diferentes algoritmos para lidar com esta situação. Por exemplo, na rede *Tendermint*, todos os utilizadores têm que votar num bloco até um voto maioritário ser atingido, enquanto em outros sistemas, é escolhido um grupo de aprovação através de randomização.

Este método apresenta alguns benefícios comparativamente ao método explicado na secção 2.4.3.1. Como se deixa de utilizar as funções criptográficas e é selecionado um grupo limitado de utilizadores que irão tomar a decisão, o consumo energético é notoriamente menor e o sistema torna-se mais eficiente. Continua a existir um processo de randomização, em que mesmo um utilizador com menos recursos pode ser o selecionado a validar o bloco. Esta característica previne a centralização, caso contrário, os utilizadores mais ricos estariam sempre a criar o próximo bloco e a aumentar a sua riqueza. Ainda, os selecionados são pagos estritamente em comissões das transações, ou seja, em moedas que já existiam em vez de ter de haver uma criação constante de novas moedas para compensação dos *miners*[26].

2.4.3.3 *Delegated Proof of Stake (DPoS)*

DPoS é um método em que um conjunto de utilizadores da rede é eleito para a missão de criar novos blocos na cadeia. Os eleitores são todos os utilizadores da rede, em que cada um recebe um número de votos proporcional ao número de criptomoedas ou *tokens* que detém. Alternativamente, os eleitores podem também escolher delegar a sua participação a outro eleitor, que irá votar na eleição dos produtores de blocos na sua vez [50].

Cada vez que um eleito produz um bloco, é pago pelos seus serviços. A comissão a ser paga é definida pelos eleitores. Se o eleito falhar na produção do novo bloco, este não é recompensado, a falha fica registada em sistema e pode conduzir a uma exclusão em votações futuras.

Este método de consenso foi concebido para garantir que todas as alterações de parâmetros no sistema são aprovadas apenas pelos maiores *stakeholders*. A autoridade administrativa é descentralizada e está nas mãos de todos os utilizadores, não esquecendo, que o número de votos que cada um tem é proporcional à sua participação no sistema[9]. A principal crítica feita a este método é o risco de centralização, devido à possível baixa participação de alguns utilizadores no processo de votação.

2.4.3.4 *Proof of authority (PoAu)*

PoAu tem origem numa modificação ao método PoS, em que em vez de se utilizar a participação como representação de estatuto, utiliza-se a identidade real. Isto é, a identidade de um utilizador na rede é a mesma que a identidade real individual e usar a identidade como estatuto implica revelá-la voluntariamente em troca da possibilidade de validar os blocos. Para o utilizador que tem este papel, isto significa que os benefícios que cria para a rede são públicos e que as suas ações maliciosas também. Devido à sua exposição, este utilizador é incentivado a preservar a rede e se este não mostrar um comportamento a favor do desenvolvimento da rede, as suas capacidades de validação de blocos devem ser retiradas .

Devido ao seu contexto centralizado, este método aplica-se principalmente a entidades em que a segurança e a integridade não pode ser posta em risco, tais como, entidades governamentais ou reguladoras. Ainda assim, o PoAu tem vindo a provar-se popular entre empresas do sector energético.

2.4.3.5 *Proof of burn (PoB)*

Neste método, os utilizadores "queimam" moedas, enviando-as para um endereço na rede em que estas ficam irrecuperáveis. Os utilizadores que o fazem, ganham a possibilidade de serem seleccionados através de um processo de randomização baseado na quantidade de moedas que queimaram. Quanto mais moedas queimarem, maior probabilidade têm de serem os seleccionados a validar o próximo bloco [18].

Considerando que PoB é uma alternativa interessante ao PoW, continua-se a gastar uma enorme quantidade de recursos físicos na resolução das funções criptográficas. Outra crítica recorrente a este método é o risco de centralização, visto que, o poder de validação de um bloco vai pertencer a quem estiver disposto a "queimar" mais moedas.

2.4.3.6 *Proof of capacity(PoC)*

O método PoC segue a mesma ideologia que o PoS, em que os utilizadores com mais participação têm maior probabilidade de validar o novo bloco, mas no PoC, em vez de participação, o que distingue os utilizadores é a capacidade de armazenagem. Quanto mais capacidade de armazenamento de dados um utilizador tem, maior a probabilidade de vir a ser ele a criar o próximo bloco.

2.5 Microredes energéticas P2P suportadas pela *blockchain*

Grandes gestores e empresas do setor energético alemão já afirmaram que a *blockchain* pode oferecer soluções a alguns dos problemas atuais da indústria elétrica [16]. Segundo a Agência Energética Alemã, a *blockchain* tem potencial para melhorar a eficiência das práticas energéticas atuais, pode acelerar o desenvolvimento de plataformas de IoT e aplicações digitais e pode trazer inovação ao mercado de trocas de energia P2P e ao desenvolvimento de FER descentralizadas. Ainda, eles concluem que esta tecnologia pode ter um forte impacto na melhoria dos processos internos, serviço ao cliente e gestão de custos das empresas de utilitários.

Microredes energéticas dedicadas a comunidades domésticas baseadas em *blockchain* permitem trocas energéticas locais entre consumidores, que são registadas de forma segura e protegida de adulteração [6].

As atuais soluções de plataformas que funcionam como intermediários entre as unidades FER e os distribuidores energéticos não permitem rastrear o ciclo de vida da energia até à sua origem. Contudo, a *blockchain* permite completa transparência sobre a origem da energia comprada, o seu tipo, a unidade que a gera e a quantidade exata produzida [16].

Segundo [74], a *blockchain* tem capacidade para guardar registos de propriedade e da origem da energia consumida e da produzida, e como tal, seria útil para aplicações de armazenamento de dados provenientes de microredes e cibersegurança na rede.

Com a criação de microredes descentralizadas que garantem as suas próprias necessidades energéticas, as grandes empresas de utilitários perdem o seu papel no mercado. Em [33], é explicado como a energia poderá ser produzida e trocada em comunidades locais devido ao aparecimento da *blockchain* que facilita a descentralização dos mercados e da disponibilidade crescente de equipamentos fotovoltaicos. Contudo, as empresas de utilitários devem tentar inovar os seus procedimentos e modelos de negócio, de forma a apoiar e acompanhar o crescimento de microredes [33].

É importante contextualizar o papel dos operadores de distribuição e transmissão energética. Estes operadores controlam a infraestrutura física das redes elétricas e são responsáveis pela sua estabilidade. A missão destes passa por garantir que as trocas de energia produzida através de FER descentralizadas possam acontecer, sem pôr em causa o funcionamento da rede elétrica. A implementação de microredes locais suportadas pela *blockchain* traria algumas vantagens aos operadores de distribuição e transmissão energética, nomeadamente: controlo mais preciso da rede, o que permitirá a cobrança de comissões de utilização da rede de transmissão pública e a possibilidade de usar a informação sobre as transações P2P gravadas na *blockchain* para melhor gerirem a capacidade e os fluxos de energia na rede. É claro que para os operadores terem acesso a este tipo de informação, teria de ser criada uma plataforma que lhes permitiria ter acesso a estes dados na *blockchain* em tempo real.

Todos os participantes da rede devem colaborar com os operadores de distribuição,

no sentido de construir previsões de procura e oferta de energia.

Ativar plataformas automatizadas de venda e compra de energia poderia ser uma forma eficiente de anunciar mudanças no preço e informação sobre os custos de energia aos consumidores [69], e em simultâneo, poderia dar incentivos aos consumidores-produtores que respondem à procura e que gerem os seus recursos elétricos de forma inteligente.

Em [73], é discutida a execução e registo de transações através de contratos inteligentes, suportadas por uma infraestrutura de controlo de dados em *blockchain*. São discutidas as vantagens em termos de segurança que a tecnologia apresenta, que permitem um registo distribuído em blocos que não podem ser modificados depois de criados. À medida que o número de *FER* continua a aumentar, manter a segurança no fornecimento e garantir que a rede se mantém a um nível de serviço aceitável passam a ser desafios prioritários. Tendo em conta que a tecnologia pode facilitar e acelerar aplicações da IoT, a *blockchain* pode ajudar a ultrapassar os desafios mencionados acima [73].

Em [67] é apresentado um exemplo de aplicação da *blockchain* à IoT, na gestão de recursos energéticos de um prédio doméstico. Neste estudo, os autores criaram um mercado autónomo entre painéis fotovoltaicos, eletrodomésticos inteligentes, veículos elétricos, contadores inteligentes e um sistema de baterias energéticas. A *blockchain* consegue distinguir a energia produzida por cada equipamento, permitindo a troca de energia entre as diferentes máquinas. Baseados nas preferências e nos limites de preço de cada utilizador, agentes programados para agir autonomamente e determinar a melhor solução, fazem propostas de compra e venda com o objetivo de trocar energia. Estes agentes podem ser programados de forma atingir um objetivo específico, por exemplo, comprar o mínimo de energia à rede pública. Os autores discutem que, de forma a manter o acesso à rede restrito aos moradores do prédio, a *blockchain* deve ser privada. A rede pública também poderia participar no mercado, por exemplo, oferecendo preços melhores do que a microrede do prédio.

Na perspetiva de criar um sistema de informação multi-agente, Sikorski [92] desenvolveu uma mercado elétrico autónomo entre máquinas em pequena escala, baseado na *blockchain*. É testado um cenário com 2 agentes produtores e 1 consumidor. A conclusão do estudo é que a tecnologia tem potencial para suportar mercados elétricos, contudo, é necessário um aumento da investigação académica sobre este tema.

O Instituto de Estudo da Economia Finlandesa realizou um relatório [68] em que argumenta que a *blockchain* pode assegurar interoperabilidade numa microrede e na IoT, garantindo transações rápidas e acessíveis. De acordo com um estudo da Deloitte [34], as operações de mercado podem tornar-se mais transparentes e eficientes. Assim, a tecnologia pode melhorar a competição entre produtores e facilitar a mobilidade dos consumidores em termos de escolha de fornecedor de energia.

Em [3], foi desenvolvido um modelo de mercado para compra e venda de emissões de carbono baseado em *blockchain*. Esta proposta facilita uma interação anónima entre participantes. Em [2], a importância da anonimidade dos participantes e a segurança

das transações nas microrredes também é estudada. Os autores criaram uma plataforma privada, descentralizada e que recorre a *tokens* para troca de energia. Num cenário de troca de energia P2P, os autores avaliam a segurança e a integridade da informação e medem a performance de mercado em várias simulações. Eles concluem que a *blockchain* se adequa à implementação de um mercado energético descentralizado e que o nível de segurança e privacidade que se obteria seria superior ao do nível obtido numa plataforma de mercado centralizado tradicional.

Em [72], é introduzida uma nova moeda virtual, chamada NRGcoin. O valor da moeda virtual é determinado por um operador de distribuição central. Segundo esta proposta, a energia renovável produzida localmente é introduzida na rede e o pagamento ao produtor-consumidor é recebido em moedas virtuais. Analogamente, os participantes da rede pagam NRGcoins ao distribuidor central pelo uso de energia.

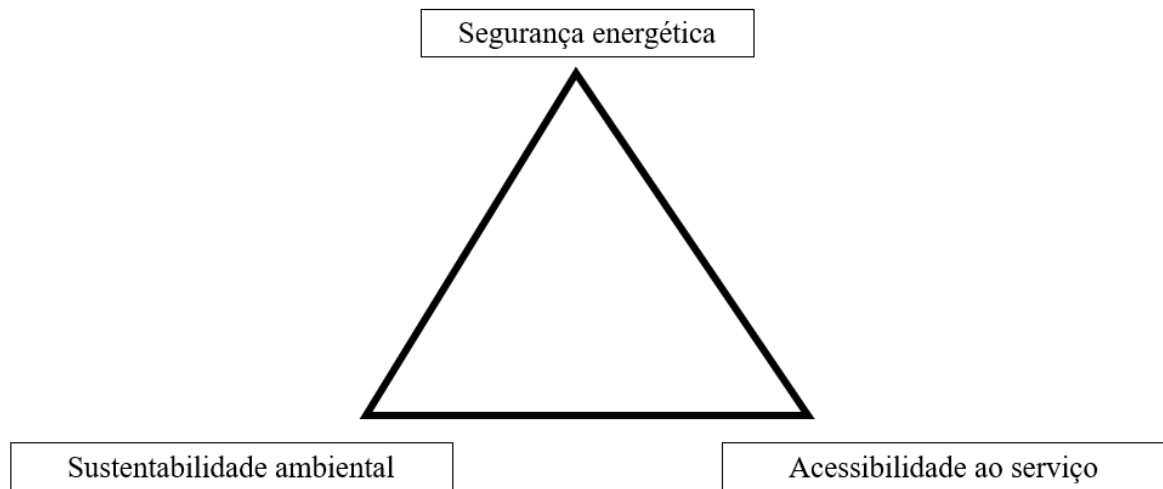
O conceito de microrrede assenta em princípios como, integração de FER, sustentabilidade e auto-suficiência. Mas, o consumo energético de um sistema de informação suportado por *blockchain* pode ser muito alto [99], o que causa um claro conflito de princípios entre tecnologias. É necessário desenvolver arquiteturas de *blockchain* eficientes, cujo método de consenso seja pouco dispendioso em termos energéticos [110]. O mecanismo de consenso da *blockchain* depende do enquadramento da microrrede. Se todos os membros da comunidade forem confiáveis, os métodos de consenso baseados na identidade real do participante podem ser o suficiente.

De acordo com um relatório recentemente publicado pela Eurelectric [64], o principal obstáculo à adoção da *blockchain* no setor energético é a troca física de energia, contrariamente às aplicações da tecnologia no setor financeiro, em que não existe uma troca física de bens.

Por forma a manter um mercado em constante atualização e atividade é necessária uma latência de transações adequada ao número de utilizadores na rede. No relatório, é referido que uma das limitações conhecidas da *blockchain* pública é o número limitado de transações por unidade de tempo. Uma latência de transações limitada pode ser uma barreira ao crescimento de uma microrrede.

Considerando as potencialidades da aplicação da *blockchain* no mercado energético, os especialistas em [6] acreditam que esta inovação pode trazer soluções ao trilema da energia representado na figura 2.3: pode reduzir os custos através da melhoria da eficiência dos processos energéticos, pode melhorar a segurança energética em termos de cibersegurança e de fornecimento, e finalmente pode promover a sustentabilidade através da promoção da instalação de FER.

Figura 2.3: Representação do trilema da energia



Através da revisão da literatura realizada, é possível identificar os benefícios e as barreiras da tecnologia *blockchain* à implementação de microrredes energéticas P2P. Além da emergente literatura académica sobre este tema, já existem vários projetos de negócio focados em microrredes suportadas pela tecnologia *blockchain*.

FORMULAÇÃO DA FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DE UMA MICROREDE ENERGÉTICA P2P

O objetivo deste capítulo é a conceção de uma ferramenta de avaliação de microrredes energéticas P2P. Com base em [10], em [40], em [69] e em [6], defini 5 propriedades necessárias à construção de uma microrede eficiente. As propriedades definidas são:

1. Enquadramento do negócio;
2. Componentes da microrede;
3. Troca de informação;
4. Funcionamento do mercado;
5. Regulamentação

Cada uma das propriedades está dividida por um conjunto de subpropriedades que são identificadas nas secções abaixo.

3.1 Enquadramento do negócio

A estruturação inicial de uma microrede implica a definição de 4 características: a proposta de valor da microrede, o conjunto dos participantes e os seus objetivos, o método de produção de energia e a sua disponibilidade no local e o modelo de negócio a ser aplicado [69].

Uma das propostas de valor de uma microrede pode ser o aproveitamento de recursos energéticos renováveis para alimentação energética de uma comunidade, ou o aumento da segurança nas trocas de energia. A definição da proposta de valor é especialmente importante na escolha de um mecanismo de estabelecimento de preços[69].

Uma microrede exige um número de participantes, em que alguns destes têm de ter a possibilidade de produzir energia. O acesso à microrede só deve ser dado a participantes que estão na mesma comunidade física ou que fazem parte de um grupo pré-definido. O tipo de participantes e a finalidade da microrede define o seu uso, que pode ser industrial, residencial, militar, etc [79].

Consoante a área e a envolvente externa e interna do ambiente em que a microrede pode vir a ser instalada, os objetivos dos participantes podem ser os mais variados. Como exemplo, o objetivo de um produtor-consumidor pode ser maximizar os seus lucros, e o objetivo de um consumidor pode ser aumentar o consumo de fontes de energia renovável [94].

O método de produção da eletricidade a ser trocada tem de ser definido, por exemplo como, produzida através de painéis fotovoltaicos, ou calor recuperado de um determinado equipamento e transformado em energia [10]. O método de produção escolhido deve ir ao encontro das FER mais comuns na região ou aos recursos naturais em maior abundância na região [78].

Por último, é fundamental estabelecer o modelo de negócio da microrede, nomeadamente, os seus participantes, o papel de cada um e como é que estes vão interagir entre si [48]. Além dos consumidores e dos produtores-consumidores, a microrede pode incluir um operador que controla o mercado local virtual ou um operador de distribuição que controla a rede principal. Através do modelo de negócio, é possível distinguir e definir a função e os direitos de cada participante.

A diversidade de microredes engloba uma grande quantidade de configurações e objetivos, que irão determinar a estratégia de gestão de energia de uma microrede em particular [79].

Considerando a revisão da literatura realizada acima, foi possível dividir o enquadramento do negócio em 4 subpropriedades. A tabela de avaliação desta propriedade está representada abaixo.

Tabela 3.1: Ferramenta de avaliação do enquadramento do negócio

Enquadramento do negócio		
Subpropriedades	Avaliação	Avaliação por subpropriedade (%)
1.Proposta de valor forte		
2.Modelo de negócio adequado		
3.Objetivo da microrede vai de encontro ao objetivo dos participantes		
4.Integração com os processos dos stakeholders		

3.2 Componentes da microrede

3.2.1 Hardware

3.2.1.1 Integração com a rede principal

Um ou mais pontos de ligação à rede principal são um componente chave e devem ser bem definidos, de forma a balancear a geração de energia e a procura dentro da microrede

[10]. Nestes pontos de ligação, o fluxo de energia deve ser medido, por forma a determinar o desempenho da microrede [69]. Existem dois tipos de microrede: a microrede física e a microrede virtual. A microrede física representa um sistema de transporte energético físico próprio e a microrede virtual apenas conecta os participantes da microrede através de um sistema de informação e o transporte da energia é feito através da rede principal. Tipicamente, as microredes físicas têm um número limitado de pontos de conexão à rede, que garantem o fornecimento de energia no caso de interrupção de distribuição na microrede. Para o funcionamento em modo ilha, as microredes necessitam de uma grande capacidade de produção de energia e flexibilidade para garantir um nível adequado de fornecimento, segurança e fiabilidade. A flexibilidade pode ser obtida através do aumento da capacidade de armazenamento da energia produzida [94].

No caso de utilização da rede principal como sistema de distribuição, como a energia é um bem físico e é transmitida através de sistemas de distribuição limitados, podem ocorrer problemas de congestão na rede [77]. A congestão no sistema de energia ocorre quando o fluxo planeado de energia em determinado componente, excede a capacidade segura do componente. Problemas de congestão podem ocorrer em casos de conexão massiva de novas cargas ao sistema, como por exemplo, uma estação de carregamento elétrico de veículos local. Tipicamente, este problema é resolvido com melhorias dos componentes do sistema de distribuição, contudo, estas melhorias não conseguem acompanhar o rápido desenvolvimento de novas instalações de FER [98].

O efeito de FER distribuídas nas perdas de energia na rede está relacionada com o seu impacto no fluxo total e depende de dois fatores: a quantidade de energia que produzem e a localização das FER na rede. Quando a FER está fisicamente próxima da procura, a energia produzida é consumida. Caso contrário, a energia dissipa-se. No caso das microredes, devido à distribuição local dos geradores de energia, as perdas devido a transporte são minimizadas [98].

3.2.1.2 Sistema de contadores inteligentes

Outro componente de hardware fulcral ao funcionamento íntegro e controlado de uma microrede é um sistema de contadores inteligentes de alta performance que é necessário para realizar a ligação entre todos os participantes do mercado, transmitir e controlar os dados à plataforma digital do mercado e fornecer acesso ao mercado. Tais operações requerem um sistema de contadores eficiente e fiável a funcionar em tempo real [69].

No mercado energético atual, a instalação de contadores inteligentes em sistemas energéticos está a aumentar [41]. Espera-se que o número de leituras de contadores inteligentes aumente de 24 milhões por ano para 220 milhões por dia para uma grande empresa energética [87]. Esta tendência combinada com o poder da automação e com a análise de *big data* tem potencial para transformar a cadeia de valor no setor energético [98].

A adoção de um sistema de contadores inteligentes que permite o controlo descentralizado tem como objetivo garantir a máxima autonomia das unidades de produção de energia renovável e das cargas dentro da microrede. A autonomia de controladores locais, implica que estes sejam inteligentes e que possam comunicar entre si, por forma a criar uma rede inteligente maior. Neste tipo de estratégias, a principal tarefa de cada controlador inteligente, não é necessariamente maximizar a receita da unidade de produção correspondente, mas sim, melhorar o funcionamento geral da microrede. A arquitetura do sistema de informação deve conter funções económicas, fatores ambientais e requisitos técnicos [45].

Um sistema multi-agente é a arquitetura indicada para o desenvolvimento de uma gestão descentralizada de uma microrede. Uma das principais características de um sistema multi-agente é de que o software em cada componente da microrede tem inteligência local [37]. Cada agente utiliza a sua inteligência para determinar ações futuras e independentemente influenciar o seu ambiente. O software de cada agente pode acomodar mecanismos de inteligência artificial que permitem uma microrede inteligente com um sistema de comunicação avançado e com capacidades de gestão similares à gestão humana. Por exemplo, num determinado momento, um gerador tem um pico de produção de 1500 W e outro gerador necessita de 500 W. A troca de energia total entre geradores pode ser ineficiente e desnecessária, já que a situação pode mudar em breves instantes. Os mecanismos de inteligência artificial fornecem o meio para a troca de mensagens do tipo "Atualmente tenho alguns watts disponíveis e não espero usá-los nos próximos 30 minutos" ou "Eu preciso de uns watts extra nos próximos 30 minutos". Além de trocar quantidades de energia e sinais *on-off*, os agentes também trocam conhecimento, comandos, princípios e procedimentos [52].

3.2.2 Software

3.2.2.1 Sistema de gestão de ofertas de compra e venda de energia do mercado (SCVM)

Segundo [69], o principal objetivo do SCVM é automaticamente assegurar o fornecimento energético de um participante do mercado enquanto implementa uma estratégia específica de realização de ofertas. O SCVM necessita de receber dados sobre os consumo e a produção do participante quase em tempo real. Baseado nestes dados, o SCVM cria previsões de consumo e produção e desenvolve as ofertas estratégicas de compra e venda de acordo com estas. Realiza ainda as ofertas com a quantidade de energia previstas e pode reagir à variação dos preços através da gestão da procura dos consumidores [76].

Sempre que o preço de mercado fosse mais baixo do que o preço limite que os participantes estão dispostos a pagar, o SCVM efetuaria a ordem de compra de energia. Contudo, a estratégia inteligente de oferta de cada produtor-consumidor pode aplicar diferentes preços a diferentes alturas e é um dos pilares de um mercado local ativo [69].

Fatores sócio-económicos como preferências ambientais e geográficas dos participantes também devem ser considerados pelo SCVM. A partir do momento que o SCVM assumir a gestão autónoma dos bens na rede e reduzir o trabalho ao utilizador final, a aceitação social da microrede também vai aumentar [40].

O SCVM necessita de estar em comunicação com a *App* a fim de saber as preferências do utilizador [48].

3.2.2.2 Sistema de informação do mercado

Um sistema de informação de alta performance é necessário para a interação entre participantes, para a constituição de uma plataforma de mercado, para gerir os acessos ao mercado e para monitorizar as operações de mercado [54]. Como o objetivo da construção de uma microrede é promover a economia de partilha descentralizada no mercado energético, segundo [48] e [45] o sistema de informação a ser aplicado tem de ser implementado de tal forma a que:

- O acesso à informação tem de ser igual para todos os participantes, de forma a evitar a discriminação;
- A realização das transações deve ser efetuada sem a necessidade de intervenção de terceiros;
- As transações se finalizem automaticamente, sem a necessidade de intervenção por parte dos participantes da microrede;
- A velocidade de estabelecimento das transações permita um funcionamento de mercado em tempo-real;
- Seja possível realizar a contabilização virtual do bem físico a ser trocado, que neste caso, é energia elétrica;

Além das características mencionadas acima, o sistema de informação tem de funcionar de forma eficiente, garantir a fiabilidade da informação e assegurar um registo vitalício das transações realizadas no mercado.

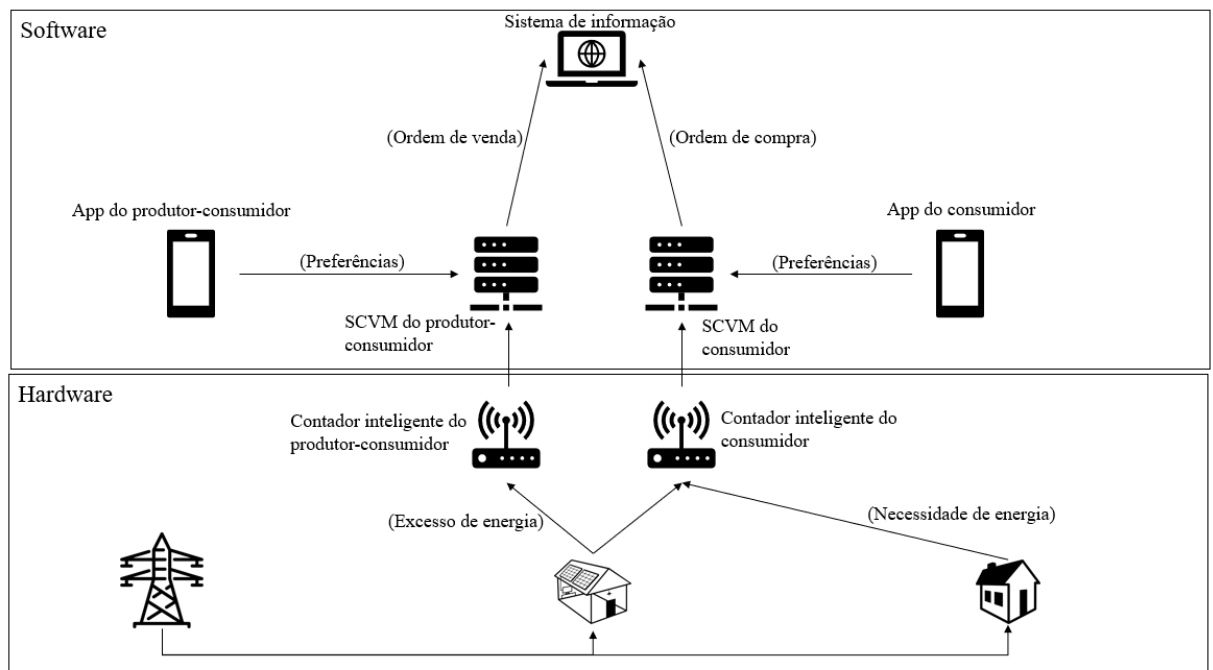
Uma *DApp* baseada em *blockchain* pode ir de encontro a estas propriedades. Por forma a garantir o estabelecimento automático de transações, uma *blockchain* baseada em contratos inteligentes seria o indicado [69]. A *blockchain* aplicada deve ter uma taxonomia que permita o controlo dos acessos, de forma, a que só os *stakeholders* possam ter acesso à verificação e ao registo das blocos. O método de consenso da *blockchain* tem de garantir que a proposta de valor da microrede está a ser seguida e que o desempenho desta está a ir no sentido dos objetivos da maioria dos participantes, enquanto, permite uma latência de transações estável e rápida [72]. Por forma a existir uma contabilização virtual da energia que é transacionada na rede, a *blockchain* aplicada tem de ter um *token* associado [68].

3.2.2.3 App para o utilizador

A *App* é o que permite estabelecer a interface entre o utilizador final (*front end*) e o sistema de informação (*back end*). Através desta, o participante tem hipótese de definir as suas preferências e consultar as operações e o desempenho do mercado.

3.2.3 Comunicação entre hardware e software

Figura 3.1: Representação da comunicação entre o hardware e o software



A informação é transferida através da conexão entre os componentes da microrrede. Podem ser identificadas quatro conexões distintas:

- Entre a *App* e o SCVM;
- Entre os contadores inteligentes e o SCVM;
- Entre o SCVM e o sistema de informação;
- Entre a rede os contadores inteligentes e os participantes;

A comunicação entre o hardware e o software assume o valor 1, se todas as conexões listadas acima estiverem ativas.

Os produtores e os consumidores introduzem as suas preferências através da *App*, enquanto os contadores inteligentes de cada um registam e replicam os dados sobre a procura (consumidores) e a produção em excesso de energia (produtores-consumidores)[6].

Baseado na leitura dos contadores e em outras informações, como por exemplo, as condições meteorológicas, o SCVM calcula previsões de consumo e produção. A inteligência computacional necessária para determinar a quantidade e o momento de compra de energia pode ser desenvolvida no SCVM. O SCVM do produtor-consumidor determina e coloca uma oferta de venda e o SCVM do consumidor determina e coloca uma oferta de compra ao sistema de informação [48].

O sistema de informação contém vários participantes, em que cada SCVM/contador inteligente representa um destes. Pela observação da figura 3.1, confirma-se que o sistema de informação realiza a interligação final entre todos os participantes.

As ofertas de compra e venda determinadas no SCVM são transmitidas ao sistema de informação. A interseção entre os valores das ofertas, as preferências dos utilizadores e as leituras dos contadores permite a formulação de um contrato autónomo no sistema de informação. Assim que todas as condições se verificarem, o sistema realiza a transação e cria um registo desta [69].

Considerando a revisão da literatura realizada acima, foi possível dividir os componentes da microrede em 11 subpropriedades. A tabela de avaliação desta propriedade está representada abaixo.

Tabela 3.2: Ferramenta de avaliação dos componentes da microrede

Componentes da microrede			
	Subpropriedades	Avaliação	Avaliação por subpropriedade (%)
Hardware	5.Pontos de ligação à rede principal		
	6.Microrede física		
	7.Sistema avançado de contadores inteligentes		
Software	8.SCVM		
	9.Acesso à informação adequado		
	10.Sistema de estabelecimento de transações autónomo		
	11.Mecanismo de contabilização de bens físicos		
	12.Sistema de realização de transações independente de terceiros		
	13.Latência das transações adequada		
	14.App para o utilizador final		
Comunicação entre Software e Hardware	15.Interoperabilidade entre Hardware e Software		

3.3 Troca de Informação

De forma a assegurar a interoperabilidade da informação trocada entre os componentes da microrede, é necessário utilizar modelos padrão de informação [19]. Um modelo padrão de informação fornece um princípio comum pelo qual a informação é definida [100], permitindo a troca de informação entre os múltiplos sistemas explicados na secção 3.2.3.

Para o *output* dos contadores inteligentes para o SCVM já existem vários modelos padrão, tal como IEC 61850. O modelo padrão de informação utilizado para a comunicação entre o SCVM e o sistema de informação depende do sistema de informação aplicado. Se o sistema de informação implementado for uma *blockchain*, ainda não existe um modelo padrão de informação para o input das ofertas de compra e venda [48].

Considerando a revisão da literatura realizada acima, foi possível dividir a esta propriedade em 2 subpropriedades. A tabela de avaliação desta propriedade está representada abaixo.

Tabela 3.3: Ferramenta de avaliação da troca de informação

Troca de informação		
Subpropriedades	Avaliação	Avaliação por subpropriedade (%)
16. Modelo padrão de informação para as leituras dos contadores inteligentes		
17. Modelo padrão de informação para a comunicação entre o SCVM e o sistema de informação		

3.4 Funcionamento do mercado

3.4.1 Mecanismo de mercado

O mecanismo de controlo do mercado contém as regras pelas quais se gerem a distribuição e os pagamentos entre compradores e vendedores, e garante uma linguagem eficiente para a realização de ofertas e um formato de oferta claramente definido. [69].

Este mecanismo é imposto pelo sistema de informação mencionado anteriormente na secção 3.2.2.2. O seu principal objetivo é estabelecer uma alocação eficiente da energia produzida, através da sincronização das ofertas de compra e de venda dos participantes do mercado em tempo real [10]. Como numa microrede, o foco é um mercado em que a compra e a venda de energia ocorre no mesmo dia que a distribuição desta [95], o mecanismo de alocação deve ser construído por forma a existir uma alocação eficiente e adequada à procura em todos os momentos. Um simples leilão de ofertas de compra e venda, limpo em janelas temporais diferentes pode ser um mecanismo de controlo que se adequa a uma microrede, como explicado em [40].

O mecanismo de controlo da microrede determina as necessidades de produção de energia e o consumo dos participantes e assegura que a energia na rede está sempre balanceada em termos de voltagem e frequência. Além do mais, o mecanismo deve promover incentivos aos consumidores que tentam que as suas horas de pico de consumo de energia sejam durante as horas com pouca procura geral [10].

A eficiência do mecanismo de mercado é determinada pelo alocação equilibrada dos recursos em todos os momentos. Ainda, o consumo energético do funcionamento do mercado e a velocidade com que as transações se finalizam, também são determinantes na eficiência do mecanismo de mercado [69].

3.4.2 Mecanismo de definição de preço

O mecanismo de definição de preço é implementado através do mecanismo de controlo de mercado, explicado na secção anterior e o objetivo é estabelecer o preço de compra e venda de energia, tendo em consideração a procura e a oferta. Leilões com ofertas uniformizadas ou ofertas individuais são uma forma de definir os preços no mercado energético [17]. Enquanto, o preço tradicional de venda de energia é composto, em grande parte, por taxas e sobretaxas, uma microrede poderá ter diferentes taxas na definição do

preço final de venda. Além das taxas legais, deve-se considerar os custos de transmissão associados à distribuição de energia [40]. Como as energias renováveis têm custo marginal perto de zero, os produtores-consumidores podem vender a energia a um custo superior ao conjunto de taxas legais e comissões por utilização da rede pública, e fazer lucro [102]. As variações no preço devem representar a quantidade de energia na rede [40], ou seja, se houver uma produção excessiva de energia, o preço de venda desta deve baixar, enquanto se houver falta de energia localmente, o preço deve aumentar. Do ponto de vista económico, um mercado local de troca de energia é positivo para os seus participantes, se o preço médio de venda é inferior ao preço médio de venda da rede principal. Contudo, se forem considerados fatores sócio-económicos, o preço da energia local ultrapassará o preço da energia produzida na rede principal.

Considerando a revisão da literatura realizada acima, foi possível dividir o funcionamento do mercado em 3 subpropriedades. A tabela de avaliação desta propriedade está representada abaixo. Visto que existem microrredes em que os preços seguem tarifas fixas, é importante avaliar se a microrrede contém ou não mecanismo de mercado e de definição de preço. No caso afirmativo, resta avaliar se o mecanismo de mercado é eficiente.

Tabela 3.4: Ferramenta de avaliação do funcionamento de mercado

Funcionamento do mercado		
Subpropriedades	Avaliação	Avaliação por subpropriedade (%)
18.Mecanismo de mercado		
19.Mecanismo de definição de preço		
20.Mecanismo de mercado eficiente		

3.5 Regulamentação

A regulamentação determina a inserção das microrredes na atual política energética, ou seja, as regras legislativas definem a estrutura do mercado, a forma como as taxas e as comissões são distribuídas e a forma como uma microrrede é integrada no mercado energético tradicional. Portanto, os governos podem facilmente apoiar a implementação de microrredes locais, por exemplo, através da introdução de subsídios de incentivo. De qualquer forma, se as microrredes apresentarem um impacto negativo no sistema energético tradicional, os governos podem ser influenciados a desencorajar a tecnologia [81].

Além da regulamentação específica das microrredes, os governos podem incentivar o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias, como por exemplo, a instalação residencial de FER, ou a adoção de criptomoedas. A regulamentação externa pode influenciar positivamente o desenvolvimento das microrredes.

A regulamentação é necessária para legalizar qualquer tipo de transação de energia e para classificar uma microrrede como parte do enquadramento energético geral. No caso de implementação de microrredes em projetos na vida real, a regulamentação é fulcral [69].

CAPÍTULO 3. FORMULAÇÃO DA FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DE UMA MICROREDE ENERGÉTICA P2P

Considerando a revisão da literatura realizada acima, foi possível dividir a influência da regulamentação em 3 subpropriedades. A tabela de avaliação desta propriedade está representada abaixo.

Tabela 3.5: Ferramenta de avaliação da regulamentação

Regulamentação		
Subpropriedades	Avaliação	Avaliação por subpropriedade (%)
21.Criação de regulamentação específica da microrede		
22.Apoio do governo à implementação da microrede		
23.Influência positiva de regulamentação externa		

3.6 Ferramenta de avaliação de uma microrede

Reunindo cada uma das tabelas, é possível a construção de uma única ferramenta que avalia as 5 propriedades definidas. A ferramenta está representada na tabela 3.6.

A ferramenta de avaliação processa-se da seguinte forma:

1. Realização da avaliação em 0 ou 1 de cada uma das subpropriedades. Se a microrede em estudo respeitar a subpropriedade, é classificada com o valor 1. Caso contrário, obtém o valor 0.
2. Cálculo da avaliação por propriedade em percentagem. Por exemplo, se em 4 subpropriedades, a microrede em estudo respeita 3 destas, a avaliação é de 75%.
3. Cálculo da avaliação final da microrede. Todas as subpropriedades têm a mesma ponderação.

No total foram identificadas cerca de 23 subpropriedades.

Tabela 3.6: Representação final da ferramenta de avaliação de uma microrede

		Enquadramento do negócio		Avaliação por subpropriedade (%)	Avaliação final da microrede (%)
Subpropriedades			Avaliação		
Hardware (1)	1. Proposta de valor forte				
	2. Modelo de negócio adequado				
	3. Objetivo da microrede vai de encontro ao objetivo dos participantes				
	4. Integração com os processos dos stakeholders				
Componentes da microrede					
Hardware (1)	5. Pontos de ligação à rede principal				
	6. Microrede física				
	7. Sistema avançado de contadores inteligentes				
	8. SCVM				
	9. Acesso à informação adequado				
Software (2)	10. Sistema de estabelecimento de transações autónomo				
	11. Mecanismo de contabilização de bens físicos				
	12. Sistema de realização de transações independente de terceiros				
	13. I.atência das transações adequada				
	14. App para o utilizador final				
	15. Interoperabilidade entre hardware e software				
Troca de informação					
Comunicação entre (1) e (2)	16. Modelo padrão de informação para as leituras dos contadores inteligentes				
	17. Modelo padrão de informação para a comunicação entre o SCVM e o sistema de informação				
Funcionamento do mercado					
	18. Mecanismo de mercado				
	19. Mecanismo de definição de preço				
	20. Mecanismo de mercado eficiente				
Regulamentação					
	21. Criação de regulamentação específica da microrede				
	22. Apoios do governo à implementação da microrede				
	23. Influência positiva de regulamentação externa				
Total (%)					

ANÁLISE DOS CASOS DE ESTUDO

4.1 Metodologia de análise dos casos de estudo

A análise da estrutura das microrredes em estudo será dividida em duas camadas. Primeiramente, a microrrede será analisada a nível da camada física e de seguida será feita a análise da camada virtual.

As premissas apresentadas na análise têm origem em informação científica publicada em contexto académico e em contexto comercial.

No caso de estudo da Microrrede de Brooklyn, as principais referências de informação foram:

- *LO3 Exergy: Business Whitepaper* [25]
- *LO3 Exergy: Electric Power Technical Whitepaper* [24]
- *Designing microgrid energy markets. A case study: The Brooklyn Microgrid* [69]

No caso de estudo da microrrede da T77, as principais referências foram:

- *Power Ledger Whitepaper* [59]
- *Case Study: Learn more about our live project with BCPG in Bangkok, Thailand* [55]

4.2 Caso de Estudo 1: Projeto da microrrede em Brooklyn

A microrrede de Brooklyn ([MRB](#)) é uma iniciativa pro-comunidade que começou em 2016 em Park Slope quando dois residentes locais realizaram a primeira transação energética P2P. Seguido deste sucesso, a microrrede de Brooklyn estabeleceu-se como um projeto beneficente, que procura trazer benefícios a todos os *stakeholders*. A LO3 Energy, uma empresa que desenvolveu uma plataforma em *blockchain* para a troca de energia, juntou-se

à Siemens, uma empresa especializada em análise de dados, e à Consensys, uma empresa especializada na relação entre a *blockchain* e a IoT, para desenvolver a tecnologia na microrede.

Atualmente, os participantes da MRB estão distribuídos por 4 redes de distribuição na área de Brooklyn: Gowanus, Park Slope, Sunset Park e Bay Ridge. Até Julho de 2018, a LO3 Energy instalou cerca de 60 contadores inteligentes aos produtores-consumidores da rede.

A área da MRB é especialmente vulnerável a falhas na rede principal, já que a taxa de utilização de capacidade energética da região está próxima dos limites. Particularmente, a zona de Borough Hall está constantemente congestionada. Além do mais, a rede elétrica tem dificuldades em acomodar o aumento da instalação de FER a a instalação de novas aplicações energéticas, como as estações de carregamentos de veículos elétricos.

Atualmente, uma grande percentagem da capacidade de geração de energia em Nova Iorque só é necessária para os momentos em que toda a gente necessita de energia. De fato, a capacidade máxima da rede local só é necessária durante 7 dias no ano, uma média de menos de 30 minutos por dia. A empresa de energia local não pode continuar a disponibilizar capital para desenvolver a capacidade da rede. Em vez disso, esta deve maximizar a utilização da rede existente [80].

A MRB visa contribuir para a resolução destes problemas e fornece um mercado de energia local no qual os membros da comunidade podem realizar transações energéticas P2P com os seus vizinhos.

Em resumo, o serviço funciona da seguinte forma: Os participantes acedem ao mercado local de energia renovável através de uma *App* móvel, criada pela LO3 Energy. Na *App*, os participantes podem escolher entre comprar energia solar local ou energia distribuída pela empresa responsável pela rede de distribuição Con Edison.

Os produtores-consumidores podem vender o excesso de energia solar ao mercado, no qual os consumidores podem fazer ofertas de compra. O mercado funciona através de leilão. Os produtores-consumidores podem exportar o excesso de energia para a rede, assim que tiverem um contador inteligente específico da MRB, que recolhe e regista os dados energéticos necessários para o funcionamento do mercado.

A MRB é constituída por duas camadas: uma camada física, constituída pela ligação à rede principal e uma microrede física e uma camada virtual, constituída por uma plataforma virtual de mercado baseada em *blockchain*, nomeada Exergy [69].

4.2.1 Camada física

Maioritariamente, a MRB usa a rede tradicional controlada pelo operador independente, Con Edison, para distribuir fisicamente a energia e só se isola em modo ilha em situações de emergência. Na figura abaixo apresenta-se a organização da microrede, em que se pode visualizar os múltiplos pontos de acoplamento (PCC) entre as FER locais e a rede de distribuição da área.

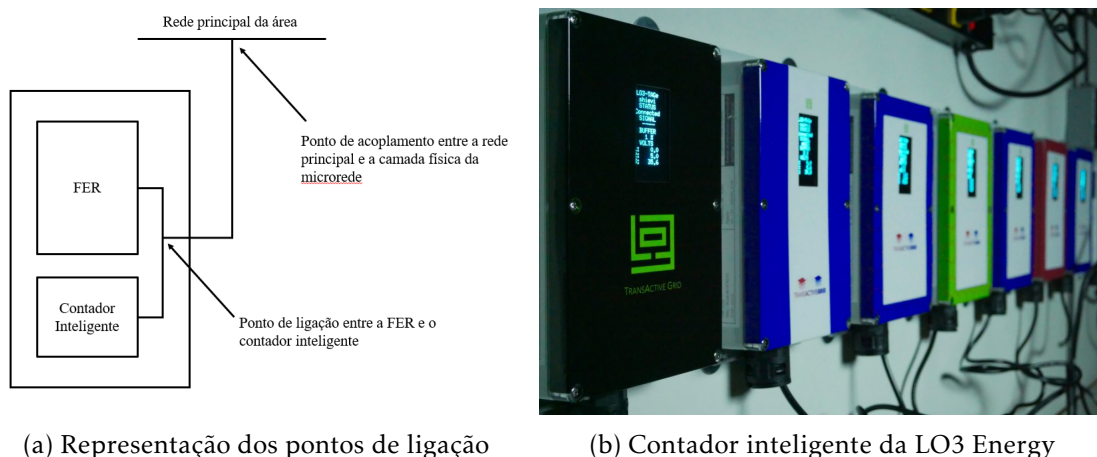


Figura 4.1: Componentes da camada física da MRB

Para avaliar e gerir o funcionamento da microrede, 4 atributos energéticos devem ser determinados, nomeadamente, o estado de conexão à rede, a voltagem da rede de distribuição, o tipo de fonte de energia renovável e a quantidade de energia produzida, no sentido de caracterizar o nível de instabilidade da área no momento de produção de energia da fonte de energia renovável. Estes atributos são fundamentais à valorização correta dos bens.

A fim de medir os atributos mencionados acima, a LO3 Energy desenvolveu, fabricou e instalou um dispositivo com IoT ativa e conectada à plataforma em *blockchain* [24]. LO3 Energy deu a cada um dos produtores-consumidores da rede um aparelho chamado Transactive Grid element, representado na figura abaixo. O dispositivo contém um contador elétrico e um computador conectado ao WI-Fi da casa. O contador mede a produção e o consumo de energia enquanto o computador funciona como SCVM. Isto é, o computador processa as medidas retiradas pelo contador, criando ofertas de compra e venda de energia. Este hardware não só funciona como um contador e como um membro de uma rede de computação distribuída, mas também como um interveniente no controlo de bens. Cada um destes contadores, representa um membro virtual da microrede.

Este dispositivo permite a transformação dos sinais do sistema local de geração de energia através de algoritmos matemáticos em movimentações monetárias no mercado.

Em adição à existente rede de distribuição, foi construída uma microrede elétrica física. Atualmente, a conexão entre a microrede física e a rede tradicional é utilizada para balancear a oferta e a procura no mercado, especificamente, quando a produção local está abaixo ou acima da procura da comunidade. Esta é a situação de mercado normal.

Contudo, a microrede física adicional pode desacoplar completamente da rede tradicional em casos de emergência e funcionar em modo ilha como um back-up para prevenir cortes de energia. Assim, edifícios prioritários, como hospitais, recebem energia a preços fixos. Residências e negócios teriam de participar no leilão da energia restante. Como a microrede física não inclui toda a microrede virtual, o fornecimento dos participantes

fora da microrrede física apenas pode ser garantido pela rede tradicional.

Enquanto todo o fluxo de energia ocorre na camada física, o fluxo de informação ocorre através da camada virtual.

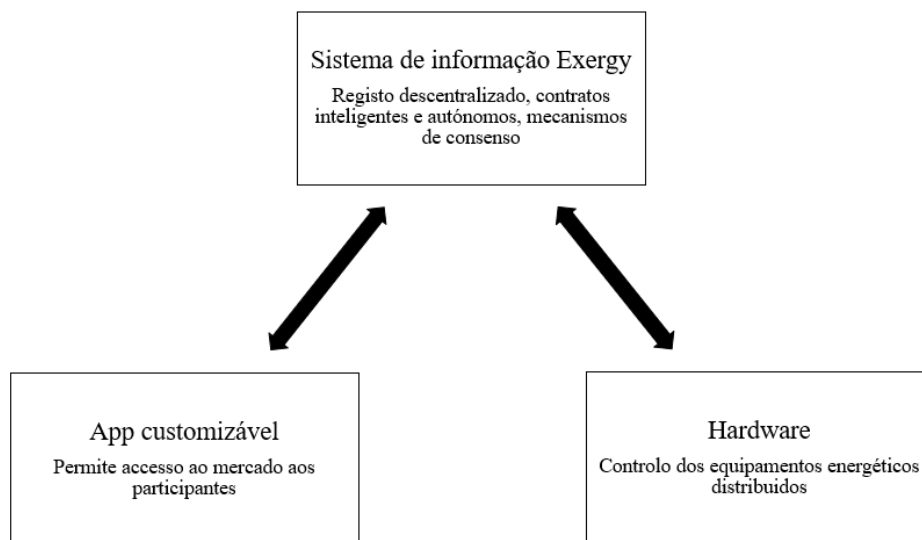
4.2.2 Camada virtual

A LO3 Energy criou uma plataforma virtual de mercado baseada em *blockchain* chamada Exergy, um sistema de registo distribuído que funciona em conjunto com os contadores inteligentes instalados na rede. É através da Exergy que são realizadas e registadas as transações financeiras entre participantes. A Exergy é um produto criado pela LO3 Energy que pode ser dividido em três constituintes: o SCVM, a plataforma em *blockchain* e a *App* disponibilizada ao utilizador final [25].

Através do SCVM da microrrede são estabelecidas as correspondências entre as ofertas de compra e as ofertas de venda no mercado e são criados os contratos inteligentes que serão selados na Exergy. Assim que as transações financeiras são verificadas, estas são adicionadas a um novo bloco, juntamente com todas as condições, preferências e informação do negócio.

Através da formação e publicação de sinais de preço, o uso de ferramentas de análise de previsões e da automação de atividades, a Exergy pode gerir o fluxo e a troca da eletricidade na rede. Tudo isto acontece no backstage, ao nível machine-to-machine (M2M).

Figura 4.2: Interação entre o software na Exergy



A Exergy funciona numa *blockchain* para consórcio, cujo acesso precisa de permissão, composta por uma rede computacional distribuída. Os participantes necessitam de comprar o *token* XRG para poderem ter acesso à plataforma virtual de mercado e para

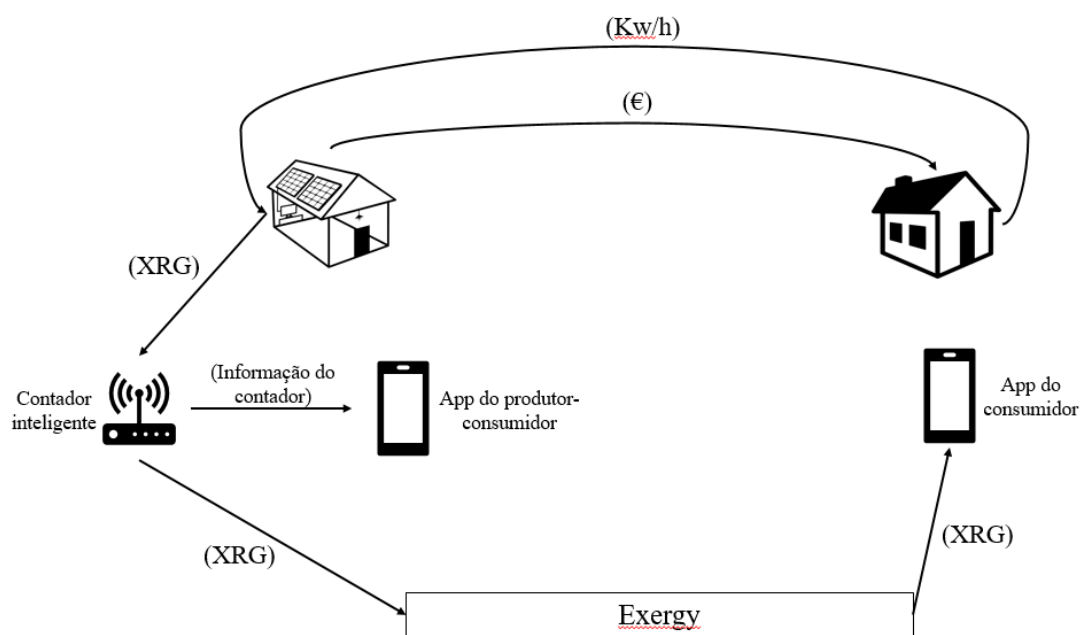
realização de transações energéticas. O funcionamento do mercado é explicado na secção seguinte, em pormenor.

O método de consenso aplicado na Exergy, é baseado no protocolo aplicado na Tendermint, explicado secção 2.4.3.2 do capítulo 2. Os novos blocos passam por um processo de votação, em que só os participantes com a maior quantidade de *tokens* em obrigações têm direito a votar. Se 2/3 dos eleitores validar o bloco, este é adicionado ao sistema. Neste caso, a LO3 participa no processo como eleitora já que é a maior detentora de *tokens*. Os donos do maior número de painéis também participam na votação, visto serem à partida os participantes físicos com mais *tokens*.

A Exergy permite a interação entre participantes sem recurso a terceiros. A gestão e controlo desta interação é feita através do SCVM nos contadores inteligentes e finalizada a nível financeiro pela Exergy.

4.2.2.1 Mercado

Figura 4.3: Representação do funcionamento do mercado local da MRB



Quando um produtor-consumidor decide que quer entrar na microrede, tem de comprar um contador inteligente e a sua instalação à LO3 Energy. O excesso de energia é medido pelo contador inteligente e, sequencialmente transformado em *tokens* XRG que podem ser transacionados no mercado. Os *tokens* indicam que uma determinada quantidade de energia foi produzida através dos painéis fotovoltaicos e podem ser transferidos da carteira digital do contador inteligente do produtor-consumidor para a dos consumidores finais através da *blockchain*. O consumidor compra os *tokens* XRG ao produtor-consumidor através de pagamentos monetários e os *tokens* são transferidos para a carteira

do consumidor. Através dos dados recolhidos pelos contadores inteligentes da LO3, os *tokens* vão sendo apagados da carteira do consumidor, à medida que a energia comprada é utilizada na casa.

Dados de consumo e produção são transferidos dos contadores Transactive Grid para as contas dos utilizadores na *blockchain*. Ainda, os utilizadores especificam na *App* o preço limite pelo qual estão dispostos a comprar energia e se querem comprar energia local renovável ou energia da rede principal. Os utilizadores podem ainda especificar se querem comprar a energia de amigos, família ou algum vizinho específico.

Considerando toda a informação, ordens de compra e venda são criadas automaticamente e enviadas para o mercado que é sustentado por contratos inteligentes. Assim que existir uma correspondência entre uma ordem de compra e uma ordem de venda e todos os termos no contrato inteligente estejam preenchidos, o pagamento é realizado e um novo bloco é adicionado à *blockchain*. Este bloco regista os termos do contrato, os intervenientes da transação, o volume de energia injetada na rede e consumida mais tarde medido pelos contadores do sistema e a ordem cronológica das transações. Todos os membros da microrrede têm acesso ao histórico de transações registadas e podem verificar as transações por eles próprios.

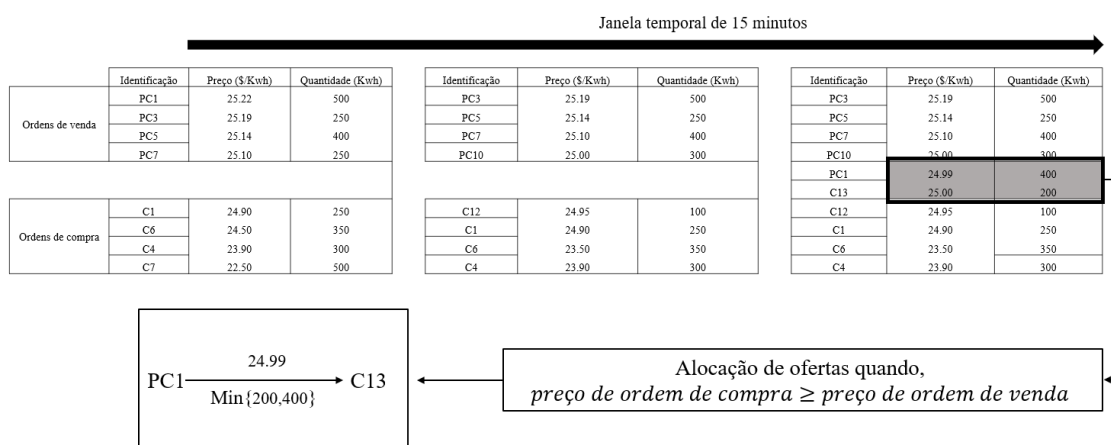
O mecanismo de mercado da MRB é implementado no SCVM. Características como coerência de dados, segurança e verificação são traços originais da tecnologia *blockchain*. Com base nas medidas da procura e da oferta, bem como, informação do mercado, a plataforma calcula e publica os preços energéticos em tempo real num interface intuitivo. Assim, os participantes podem reunir dados sobre o mercado, e sobre a produção e consumo e definir necessidades de energia adequadas. A compra e venda de energia é feita, em grande parte, automaticamente através do SCVM e apenas requer várias preferências dos participantes, tais como, os limites de preço e as fontes de energia preferidas.

O mecanismo de mercado da MRB é similar ao analisado em [40]. O mecanismo de mercado é constituído por um registo de ordens de compra e venda com uma janela temporal finita de 15 minutos, em que ao final desta, todas as ofertas de compra e venda são apagadas. No fundo, funciona como um leilão. O mecanismo está exemplificado na figura 4.4.

Qualquer produtor-consumidor e consumidor interessado em trocar energia na próxima janela temporal, pode submeter a sua ordem através do SCVM. Qualquer ordem inclui uma quantidade de energia e um preço por unidade de energia. O consumidor cria ordens de compra com o valor máximo que estão dispostos a pagar pela fonte de energia escolhida. Os produtores-consumidores submetem ordens de venda com o valor mínimo a que eles estão dispostos a vender a sua energia. A oferta do consumidor disposto a pagar o maior preço é alocada à oferta de venda do produtor-consumidor com o valor mais baixo, mas sempre tendo em conta, as preferências dos participantes. O preço da última alocação de ofertas é o preço final de mercado para aquela janela temporal.

Consumidores que têm o limite de preço inferior ao preço final da janela temporal,

Figura 4.4: Exemplificação do mecanismo de mercado da MRB



serão fornecidos por fontes de energia adicionais, como energia distribuída em comunidades exteriores ou energia produzida através de combustíveis fósseis. O preço é definido através de um método de leilão similar ou é pré-definido pelos produtores e distribuidores.

As transações financeiras são realizadas entre o comprador e o vendedor de acordo com regras de pagamento pré-definidas que também estão incluídas no mecanismo de mercado.

Na camada virtual, a compra e venda energética local é efetuada e os respetivos fundos transferidos. Contudo, do ponto de vista da camada física, os consumidores só pagam aos consumidores-produtores por alimentarem a rede de distribuição com energia renovável produzida localmente. Assim, estes aumentam a percentagem de energia renovável presente na comunidade. A compra e venda local é feita apenas virtualmente através da *blockchain* e não tem qualquer influência na distribuição física de eletricidade. A percentagem de energia renovável local que satisfaz a procura da comunidade aumenta à medida que o a produção é incentivada por preços de mercado favoráveis. De notar que a probabilidade de consumir realmente energia renovável local aumenta.

4.2.2.2 Papel do Operador de Distribuição

Tendo em conta que atualmente, a MRB ainda faz uso da rede principal de distribuição, é importante perceber o papel do operador de distribuição. O operador de distribuição da rede principal permitiu o uso da rede em troca de uma taxa de utilização da infraestrutura. A taxa é cobrada em cada transação P2P que utiliza a rede principal.

Até à data, as trocas de energia P2P na MRB não funcionam sem a participação das empresas de energia. A MRB está a trabalhar com estas empresas para refinar o estrutura legal por trás do projeto.

4.3 Avaliação do Caso de Estudo 1

Considerando os fatos apontados na secção 4.2, foi possível fazer a análise dos requisitos formulados no capítulo 3 para a MRB. No fim da análise é realizada a avaliação da microrede através da ferramenta criada e a respetiva análise SWOT.

4.3.1 Enquadramento do negócio

1. A microrede tem uma proposta de valor forte?

A proposta de valor deste projeto é a sustentabilidade ambiental, a eficiência energética e o fortalecimento das comunidades. Tendo em conta a envolvente externa atual, em que a sustentabilidade é uma prioridade constante e que a eficiência é uma forma de a atingir, a proposta de valor da MRB pode incitar bastante interesse das comunidades locais.

2. A microrede tem um modelo de negócio adequado?

Atualmente, o modelo de negócio aplicado permite o ganho financeiro dos membros da comunidade e da empresa de distribuição. Os produtores-consumidores vendem o excesso de energia e a empresa de energia regional ganha comissões pela utilização da rede principal e vende energia através da plataforma de mercado implementada. De qualquer forma, o papel financeiro da LO3 Energy continua indefinido. A LO3 Energy é responsável pelo controlo da plataforma mercado mas não é recompensada por tal. Novos modelos de negócio que incluam a participação financeira de todos os *stakeholders* devem ser considerados.

3. O objetivo da microrede vai ao encontro aos objetivos dos participantes?

O objetivo dos participantes locais é uma combinação entre ganho financeiro, desenvolvimento de fontes de energia sustentáveis e aumentar a autonomia e o poder da comunidade. Como projeto beneficente e a favor da comunidade, a MRB está alinhada com estes objetivos.

4. A microrede integra a troca de energia P2P com os processos dos *stakeholders*?

A LO3 Energy é responsável pelos processos de operar a plataforma virtual de mercado, instalar os contadores inteligentes, analisar a informação, assegurar as transações entre participantes e garantir segurança de fornecimento na microrede. A Con Edison e os produtores-consumidores locais são responsáveis pelo processo de abastecimento de energia. Tal organização, permite a troca direta de energia entre participantes.

4.3.2 Componentes da microrede

4.3.2.1 Hardware

5. Existem pontos de ligação à rede principal?

No sentido de aproveitar os recursos já existentes na área, nomeadamente, a rede de distribuição da região, foram instalados diversos pontos de conexão entre as FER e a rede controlada pela empresa de energia local, Con Edison. Ainda, como os participantes podem escolher entre comprar energia renovável local ou energia produzida pela Con Edison, é necessária a ligação à rede principal.

6. Existe uma microrede física?

Além da rede de distribuição principal, o projeto da MRB inclui a instalação de uma microrede física. O principal objetivo da microrede física é garantir uma segurança no caso de emergência. Se ocorrer uma falha energética na região, a microrede pode garantir os serviços mínimos nos edifícios prioritários.

7. A microrede contém um sistema avançado de contadores inteligentes?

A LO3 Energy fez a instalação de contadores inteligentes nos edifícios dos participantes. O sistema instalado realiza 60 leituras a cada segundo, o que permite um acompanhamento da rede, quase em tempo real. O sistema de contadores da MRB é realmente um sistema multi-agente que permite uma gestão descentralizada da microrede. Estes contadores têm inteligência local para determinar ações futuras e influenciar o funcionamento geral da microrede.

4.3.2.2 *Software*

SCVM

8. Existe um SCVM na microrede?

Os contadores inteligentes desenvolvidos pela LO3 Energy contêm também um computador com capacidades computacionais e de armazenamento que permitem o funcionamento de um SCVM. Este ainda não foi testado em ambientes reais com grande stress, mas está em constante teste, desenvolvimento e atualização à medida que a MRB vai crescendo em termos de número de participantes .

Sistema de informação do mercado

9. O acesso à informação é adequado?

O fato de a *blockchain* ser de taxonomia privada garante que apenas os *stakeholders* possam aceder ao sistema, garantindo assim segurança na partilha e acesso de dados. Assim, em termos de partilha de informação, todos os membros incluídos na microrede podem consultar a atividade do mercado.

10. Contém um sistema de estabelecimento de transações autónomo?

Sim, através da interseção entre as preferências dos utilizadores e as leituras dos contadores inteligentes, são determinadas as cláusulas dos contratos inteligentes.

Assim que todas as condições estiverem reunidas, o contrato é celebrado e as transações são realizadas.

11. Foi implementado um mecanismo de contabilização de bens físicos?

Sim, foi implementado um sistema baseado em um *token*, chamado XRG *token*. O *token* permite o acesso à rede e o controlo digital da energia trocada na rede. A energia vendida é representada em *tokens* XRG que são transferidos para a carteira digital do consumidor e eliminados da carteira do produtor-consumidor. À medida que a energia é consumida, os *tokens* são eliminados da carteira do consumidor. Assim, os *tokens* funcionam como valiosa informação sobre o consumo e produção na microrrede.

12. Contém um sistema de realização de transações independente de terceiros?

A *blockchain* da Exergy permite a realização de transações internas de forma descentralizada e os participantes da microrrede têm influência na verificação das transações. As transações dentro do ecossistema são realizadas através da *blockchain* e a moeda do mercado são os *tokens* XRG. Como o método de consenso aplicado neste caso é o protocolo aplicado no Tendermint (explicado em 2.4.3.2), o poder de decisão na aprovação dos novos blocos na *blockchain* está nas mãos dos participantes com maior número de XRG *tokens*. Os XRG *tokens* são dados em troca de unidades de energia produzidas. Assim, o poder de decisão sobre os novos blocos está nas mãos dos maiores produtores-consumidores da rede, que como podem vender e lucrar através da energia produzida nos seus telhados, têm todo o interesse em manter a consistência e a integridade das transações. Ainda, como as validações dependem de 2/3 dos eleitores, até pode haver um elemento no corrupto no sistema que este será ignorado e não terá hipótese de impor a sua vontade. A verificação dos blocos é realizada autonomamente através da utilização de algoritmos.

Contudo, por forma a comprar o *token*, os consumidores recorrem a métodos como o pagamento em cartão de crédito, ou o pagamento através de *paypal*. As únicas transações independentes de terceiros, são as transações do *token* XRG.

Portanto, a nível interno, as transações são realizadas independentemente de terceiros. Mas a nível externo, existe uma transação monetária entre consumidor e produtor-consumidor. Logo, o sistema de realização de transações não é independente de terceiros.

13. A latência das transações é adequada?

A melhor latência atingida foi de 1 segundo por bloco. Mas tendo em conta que, a rede ainda tem um número de participantes reduzido e que à medida que o número de transações vão aumentando, a latência também aumenta, é prioritário melhorar a latência das transações na MRB.

App do utilizador

14. Existe uma aplicação para o utilizador?

Além da plataforma em *blockchain* e do SCVM, a Exergy contém uma aplicação para o utilizador final, em que este pode definir as suas preferências, a fonte de energia prioritária, acompanhar os seus consumos e a atividade do mercado em geral.

4.3.2.3 Comunicação entre Software e Hardware

15. Existe interoperabilidade entre os componentes da microrrede?

Atualmente, todos os componentes estão a funcionar em conjunto. O fluxo energético está a realizar-se, com a transferência de energia através da rede. Em simultâneo, o fluxo de informação vai desde os contadores até ao registo no livro-razão, finalizando as transações. Contudo, existem alguns problemas de comunicação entre a *blockchain* e os contadores inteligentes que dificultam a realização das transações.

4.3.3 Troca de Informação

16. Existe um modelo padrão de informação para as leituras dos contadores inteligentes?

O modelo padrão de comunicação das leituras dos contadores inteligentes já está implementado nos contadores inteligentes da LO3. O modelo instalado na MRB é o IEC 61850.

17. Existe um modelo padrão de informação para a comunicação entre o SCVM e o sistema de informação?

Ainda não existe um modelo padrão de informação para *blockchain*, o que faz, com que sempre que se desencadeia uma alocação de ofertas, os dados têm de ser descodificados e reinterpretados por forma a dar início à respetiva transação.

4.3.4 Funcionamento do mercado

18. O mercado tem um mecanismo de funcionamento?

O mecanismo de mercado implementado é o mecanismo de leilão, em que quem está disposto a pagar mais é alocado às ofertas de venda de energia local mais baixas. Além do preço, existem outras constantes que entram na assignação das ofertas, como por exemplo, a preferência por energia produzida por um vizinho. A cada 15 minutos, começa um novo leilão.

A criação autónoma de ofertas de compra e venda, baseadas na preferência e nos dados de produção e consumo está implementada.

19. A microrrede tem um mecanismo de definição de preço?

Um preço final é determinado no fim de cada janela temporal. Os preços vão variar de acordo com a procura e a oferta e de acordo com os fatores socioeconómicos.

20. O mecanismo de mercado é eficiente?

O mecanismo de mercado favorece quem está disposto a pagar mais pela energia renovável local. O fato de ser um mecanismo em leilão, não permite a distribuição de energia renovável por todos os participantes. Os consumidores que não conseguem obter alocação de energia renovável, têm de comprar à empresa produtora local, que pode ter sido produzida a partir de combustíveis fósseis.

Como por enquanto existe um número reduzido de produtores-consumidores, não existe uma grande oferta de energia, e consequentemente, o valor desta é muito elevado. De qualquer forma, espera-se que com o crescimento da microrrede, principalmente do número de produtores-consumidores, aconteça a desvalorização da energia e que esta fica mais acessível a todas as carteiras locais.

Além do mais, o estabelecimento das transações é feito através da *blockchain* e com o aumento do número de participantes e consequentemente, do número de transações, a quantidade de energia gasta no processo de verificação das transações pode ser muito elevada, o que causa um contra senso contra a proposta de valor da microrrede assente na promoção da sustentabilidade e eficiência.

4.3.5 Regulamentação

21. Foi criada regulamentação específica para a implementação da MRB?

O ambiente legal ainda não permite transações energéticas P2P entre 2 moradores sem o envolvimento de outros *stakeholders*, neste caso, da empresa de energia Con Edison. Por agora, a Con Edison continua a ser o operador de distribuição independente da área da MRB. A LO3 Energy está a trabalhar no sentido de se tornar a empresa distribuidora local, por forma a ter o controlo total da microrrede.

22. O governo local apoiou a implementação da microrrede?

Não foi dado qualquer incentivo público ao desenvolvimento do projeto. O investimento inicial para o desenvolvimento do projeto foi obtido através do lançamento de uma ICO.

23. Existe influência positiva de regulamentação externa?

Os Estados Unidos da América desenvolveram uma política chamada *Energy Efficiency Resource Standard* (EERS), cujo objetivo é encorajar uma produção, transmissão e uso de energia mais eficiente. As políticas da EERS obrigam as empresas de energia a aumentar a eficiência dos seus próprios processos e sistemas de distribuição e

oferecer programas de gestão de consumo e incentivos que encorajem à poupança por parte dos consumidores [5].

A MRB vai de encontro à EERS, no sentido, em que a energia é distribuída de forma mais eficiente entre vizinhos e que o fluxo de informação permite uma gestão da rede também mais eficiente, ao ponto de ser possível criar programas de gestão de consumo.

Em Junho de 2019, o estado de Nova Iorque desenvolveu o *Climate Leadership and Community Protection Act* (CLCPA), em que foram definidas novas metas para a produção de energia renovável no estado [83]. O CLCPA requer que o estado reduza as emissões de gases de efeitos de estufa até 85 % abaixo dos níveis emitidos em 1990, até 2050. Também definiu que os restantes 15 % devem ser compensados com a plantação de espaços verdes. A lei requer também que 70 % da energia obtida pelas empresas de energia seja produzida através de FER, até 2030.

Tendo em conta que a forma de produção de energia na MRB é através de painéis fotovoltaicos e que esta incentiva a utilização de energias renováveis, a MRB também vai de encontro à CLCPA.

O Governador local criou a iniciativa *Reforming the Energy Vision* (REV) cujo objetivo é divulgar informação aos consumidores sobre as melhores escolhas energéticas, sobre os novos projetos energéticos desenvolvidos no Estado e sobre como as micro-redes podem empoderar as comunidades locais [85]. A REV pode contribuir para a divulgação da MRB entre os consumidores locais.

Ainda, os residentes de Nova Iorque que instalam equipamento fotovoltaico têm direito a receber o *Renewable Energy Tax Credit* (RETC), que implica que o estado pague cerca de 30 % do preço da instalação do equipamento [96].

Em adição à *Renewable Energy Tax Credit*, os nova-iorquinos que instalam painéis solares nos seus edifícios também têm direito a uma taxa de crédito anual de 25 % sobre o preço de instalação até 5000 \$ e o governo local também declarou a insenção de alguns impostos sobre a compra de painéis fotovoltaico.

4.3.6 Aplicação da ferramenta de avaliação

A tabela 4.1 permite a avaliação da microrrede segundo os requisitos formulados no capítulo 3. Com base na análise da tabela verifica-se que, dos 23 requisitos, a MRB cumpre cerca de 16, o que significa uma classificação final de 69.54 %. A propriedade “Componentes da microrrede” é a propriedade com melhor avaliação, de 81.81 %. A propriedade “Regulamentação” é a que tem a avaliação mais baixa, de 33.33%.

Tabela 4.1: Aplicação da ferramenta de avaliação à MRB

Enquadramento do negócio			
Subpropriedades		Avaliação	Avaliação por subpropriedade (%)
1.Proposta de valor forte		1	
2.Modelo de negócio adequado		0	75.00
3.Objetivo da microrrede vai de encontro ao objetivo dos participantes		1	13.04
4.Integração com os processos dos stakeholders		1	
Componentes da microrrede			
Hardware (1)	5.Pontos de ligação à rede principal	1	
	6.Microrrede física	1	
	7.Sistema avançado de contadores inteligentes	1	
	8.SCVM	1	
	9.Acesso à informação adequado	1	
Software (2)	10.Sistema de estabelecimento de transações autónomo	1	81.81
	11.Mecanismo de contabilização de bens físicos	1	
	12.Sistema de realização de transações independente de terceiros	0	
	13.Latência das transações adequada	0	
	14.App para o utilizador final	1	
Comunicação entre (1) e (2)		1	
Troca de informação			
16.Modelo padrão de informação para as leituras dos contadores inteligentes		1	50
17.Modelo padrão de informação para a comunicação entre o SCVM e o sistema de informação		0	4.34
Funcionamento do mercado			
18.Mecanismo de mercado		1	
19.Mecanismo de definição de preço		1	66.67
20.Mecanismo de mercado eficiente		0	8.69
Regulamentação			
21.Criação de regulamentação específica da microrrede		0	
22.Apoios do governo à implementação da microrrede		0	33.33
23.Influência positiva de regulamentação externa		1	
Total (%)			69.54

Tabela 4.2: Análise SWOT da MRB

Ambiente Interno	Forças	Fraquezas
	<ul style="list-style-type: none"> - Proposta de valor; - Objetivo da microrrede; - Integração com os processos dos stakeholders; - Pontos de ligação à rede principal; - Microrrede física; - Sistema avançado de contadores inteligentes; - Acesso à informação adequado; - Sistema de estabelecimento de transações autónomo; - Mecanismo de contabilização de bens físicos; - App para o utilizador final; - Interoperabilidade entre hardware e software 	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo de negócio inadequado; - Ausência de sistema de realização de transações dependente de terceiros; - Baixa latência de transações; - Ausência de modelo padrão de comunicação entre o SCVM e o sistema de informação; - Ineficiência do mecanismo de mercado;
Ambiente Externo	Oportunidades	Ameaças
	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento de modelos padrão de comunicação com a blockchain; - Desenvolvimento dos algoritmos que suportam o método de consenso, em termos de velocidade e de gasto de energia; - EERS; - CLCPA; - Investimento de empresas do setor energético; - Necessidade de reduzir as despesas públicas em infraestrutura de produção e distribuição energética no Estado de Nova Iorque; - REV; - RETC; - Isenção de impostos na compra de equipamento de produção fotovoltaica; - Taxa de crédito anual aplicada a quem instala painéis fotovoltaicos; - Necessidade de alternativas que garantam fiabilidade no fornecimento de energia 	<ul style="list-style-type: none"> - Custos de instalação de painéis fotovoltaicos; - Preço da energia renovável produzida localmente; - Falta de divulgação da microrrede; - Falta de informação sobre a tecnologia que suporta a microrrede; - Falta de regulamentação dedicada às microrredes; - Ausência de apoios públicos para o desenvolvimento do projeto;

4.3.7 Análise SWOT

A partir da avaliação realizada em 4.3.6, foi possível identificar os pontos fortes e os pontos fracos, a nível interno, e as oportunidades e as ameaças, a nível externo, da microrede de Brooklyn, representados na tabela 4.2.

4.3.7.1 Forças

A nível de componentes da microrede, a LO3 Energy desenvolveu um contador inteligente muito eficiente que permite a realização das leituras, a computação de dados e a comunicação M2M.

A MRB apresenta uma microrede física com pontos de ligação a edifícios prioritários, que no caso de corte da rede de distribuição principal devido, por exemplo, a um desastre natural, permite a continuação do fornecimento de energia a edifícios como hospitais.

A *blockchain* privada baseada no protocolo da *Tendermint* revelou-se uma escolha acertada, que permite o controlo dos acessos à informação, garante a fiabilidade da informação e assegura o funcionamento da microrede em prol da comunidade. Ainda, permite a criação de contratos inteligentes que permitem o estabelecimento autónomo de transações dos *tokens* XRG.

Os contadores inteligentes estão conectados às *FER* locais. A interação entre a *App* do utilizador final e os contadores inteligentes está operacional e as preferências dos utilizadores estão a ser consideradas no momento de criação automática de ofertas de compra e venda no SCVM. Ainda que sem padrão de comunicação, o SCVM está a comunicar com a *blockchain*, para a realização das transações.

4.3.7.2 Fraquezas

Em termos de enquadramento do negócio, os requisitos são cumpridos. Contudo, é necessário definir um modelo de negócio que inclua a participação financeira da LO3 Energy, ou a LO3 Energy necessita de se estabelecer como o único distribuidor de energia da microrede física e virtual, e ser o único stakeholder da microrede, além dos produtores-consumidores e dos consumidores.

Considerando que as transações externas são realizadas entre os participantes através de movimentos bancários, a compra e a venda de energia ainda depende de terceiros. Enquanto não for aplicada a utilização de uma criptomoeda, a MRB vai continuar a depender das instituições financeiras locais.

A falta de um modelo padrão de comunicação de informação entre o SCVM e a *blockchain* está a impedir a realização de transações à velocidade necessária.

O mecanismo de mercado favorece apenas quem está disposto a pagar mais e não permite uma distribuição equilibrada da energia renovável local. Além disso, devido à aplicação da tecnologia *blockchain*, é consumida muita energia no algoritmo de verificação

das transações, o que é contraproducente com um dos princípios fundamentais da MRB, eficiência energética.

4.3.7.3 Oportunidades

O *blockchain* é uma tecnologia que ainda não está pronta para a utilização em grande escala e em mercados que envolvem a troca de bens físicos. O gasto energético da tecnologia é insustentável. Contudo, a tecnologia é recente e está constantemente a ser aplicada em novos mercados. Os princípios fundamentais da tecnologia atraíram a atenção de grandes empresas como IBM e a Microsoft, e estas estão a trabalhar no sentido de a desenvolver e ultrapassar os desafios que esta apresenta.

O Governo de Nova Iorque desenvolveu o CLCPA e garantiu múltiplos incentivos para os habitantes que decidem instalar painéis fotovoltaicos. O número de donos de painéis fotovoltaicos vai continuar a crescer e, conseqüentemente, a MRB pode vir a reunir mais participantes.

Devido à atual discrepância entre a capacidade total do sistema de distribuição e o consumo médio dos nova-iorquinos anual, continuar a desenvolver infraestrutura para suportar os picos de procura energética não é sustentável. Em vez disso, é necessário aproveitar com maior eficiência os recursos já existentes. Como a MRB permite a troca de energia entre vizinhos através do sistema de distribuição principal, o desenvolvimento desta está a contribuir para o aumento da eficiência energética no estado.

A MRB é uma das formas de garantir o fornecimento de energia em caso de corte do sistema de distribuição principal. Tal característica diferenciadora pode ser um interessante para atrair o investimento das entidades públicas, responsáveis por manter a ordem no Estado em situações de emergência.

A tecnologia inovadora desenvolvida pela LO3 Energy chamou a atenção de grandes empresas do setor energético. A Shell, empresa energética britânica-holandesa e a Sumitomo Corporation, empresa energética chinesa, as duas pertencentes ao ranking da *Fortune 500*, decidiram investir na LO3 Energy, por forma a incentivar o desenvolvimento da tecnologia.

4.3.7.4 Ameaças

A instalação de painéis fotovoltaicos continua a ser um processo caro e apenas ao alcance dos mais ricos.

Como ainda não existe um número substancial de produtores-consumidores, a produção de energia em excesso ainda não é muita. Assim, como a oferta é reduzida, o preço da energia renovável local é mais alto.

Não existe regulação local específica dedicada à implementação de microrredes no estado de Nova Iorque, mas a regulamentação nesta vertente do mercado energético necessita de ser adaptada antes da aplicação comercial das microrredes. É uma lacuna importante na regulamentação dos mercados energéticos da maioria dos países.

A falta de divulgação da informação sobre a tecnologia que suporta a MRB também é uma ameaça ao crescimento da MRB. Se os consumidores desconhecem a tecnologia e não tiverem noção das implicações e dos benefícios, vão estar mais reticentes à participação na MRB.

O projeto da MRB não foi financiado por apoios públicos.

4.4 Caso de estudo 2: Projeto da Power Ledger e BCPG

A Power Ledger (PL), uma empresa australiana sediada em Perth dedicada à digitalização do mercado energético, em conjunto com a BCPG, uma empresa tailandesa que faz a produção e instalação de equipamentos produtores de energia renovável, lançaram um projeto pioneiro de trocas de energia renovável P2P no centro de Bangucoque, em Agosto de 2018. Este foi o primeiro projeto na Ásia em que energia renovável foi trocada diretamente entre consumidores e produtores-consumidores.

O projeto está a ser aplicado na zona T77 da cidade, e envolve uma área de 8 hectares. O objetivo é permitir a compra e venda de energia entre 4 edifícios: o centro comercial Habito, a Bangkok International Preparatory & Secondary School, um edifício de apartamentos, e o Dental Hospital Bangkok.

Pela primeira vez no Sudeste Asiático, a empresa de energia pública tailandesa, Metropolitan Electricity Authority (MEA), permitiu o acesso à rede principal para a transação física de energia. De acordo com o Diretor de Operações da Power Ledger, David Martin, “ter uma empresa de energia que permite as trocas de energia entre os habitantes do T77, foi um passo importante na missão de permitir aos indivíduos residentes a possibilidade de trocar o excesso de energia renovável produzida” [58].

A realização deste projeto, permitiu aos gestores dos edifícios a troca de energia renovável produzida através dos painéis fotovoltaicos instalados nos telhados de cada edifício com a realização de acordos financeiros automáticos suportados por uma interface bancária segura.

A BCPG foi responsável pelo desenvolvimento da infraestrutura física da microrrede, enquanto a Power Ledger forneceu a sua tecnologia baseada em *blockchain* como a camada virtual que permite a monitorização das transações energéticas entre participantes, a validação de transações P2P, a determinação de padrões de consumo dos participantes e a avaliação das posições de cada participante no mercado [55].

4.4.1 Camada física

A BCPG projetou e instalou os painéis fotovoltaicos nos telhados de cada um dos edifícios, perfazendo uma capacidade energética total de 635 KW. Ainda, instalou os pontos de acoplamento entre os painéis fotovoltaicos e cerca de 18 contadores inteligentes [58].

A PL apenas trabalha com contadores inteligentes que vão de encontro aos requisitos

impostos na norma ANSI C-12.1-2008. Segundo esta norma, a precisão mínima do contador tem de ser 2 %. De qualquer forma, para assegurar integridade na informação medida, a precisão de cada contador foi testada, com ambas as empresas BCPG e PL a analisar os resultados das medições. Os contadores estão ligados em rede e trocam informação entre si através desta.

4.4.2 Camada virtual

A PL criou um sistema de informação dividido por níveis, que gere o processo de troca de energia desde o momento de acesso à rede até à transação energética e o respetivo pagamento monetário [59].

A base da flexibilidade deste mercado desenvolvido pela PL, é a implementação de um sistema com dois *tokens*, *powr* e *sparkz*, que interagem entre 2 *blockchains* diferentes, um pública e uma privada.

4.4.2.1 Tokens

Os *powr tokens* podem ser vistos com um token global que permite o acesso à plataforma para todos os participantes. O *powr* é um *token* de acesso, que permite aos anfitriões da rede a utilização da plataforma virtual. Na prática, comprar *powr tokens* é como comprar um licença de utilização de software. Os *powr tokens* podem ser comprados através de mercados públicos acessíveis a qualquer tipo de participante.

Os *sparkz tokens* são emitidos contra um depósito de *powr tokens*, através de um contrato de obrigação inteligente e utilizados pelo anfitrião da rede para dar acesso aos participantes desejados. Estes *tokens* são o *token* a nível do mercado local e estão especificamente limitados a representar o valor em *tokens* de uma unidade de moeda. Por exemplo, em Portugal, 1 *sparkz* = 1 cêntimo. Os próprios *sparkz* estão fixados à moeda local, ou seja, estes não podem ser transferidos entre microrredes em locais com diferentes regulações.

Sparkz e *powr* são permutáveis e permitem a interação entre os vários níveis do sistema de informação. Os *sparkz* mantêm uma taxa de mercado estável entre os preços da eletricidade local e o valor do *powr* definido em mercados públicos.

4.4.2.2 Mercado

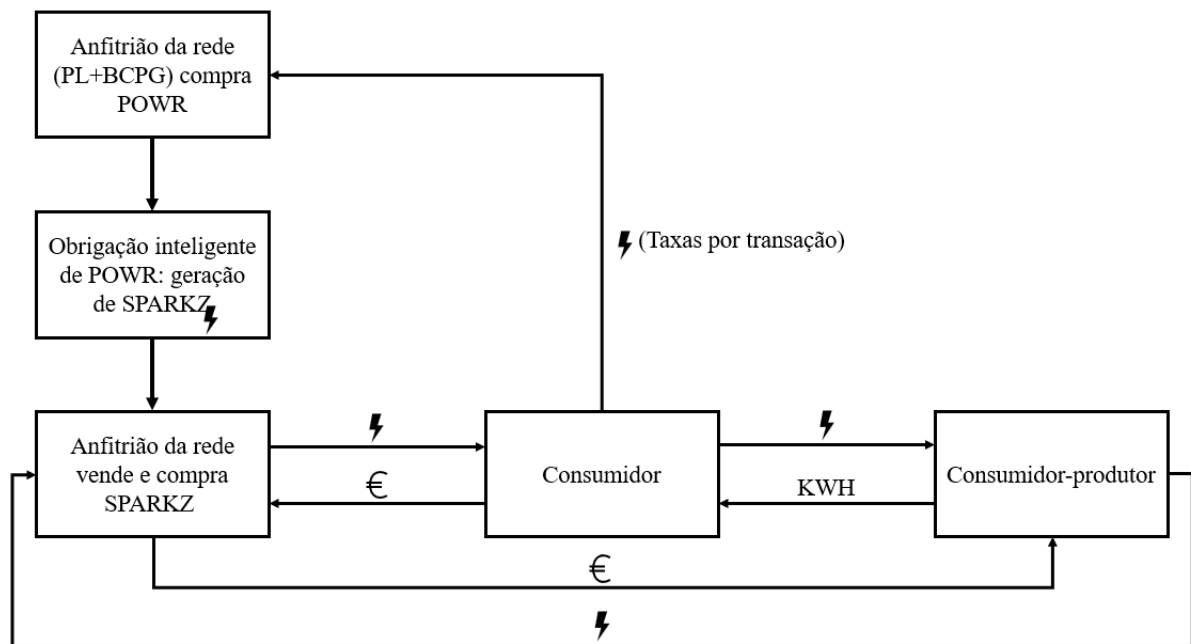
No caso em estudo, o anfitrião da rede é a parceria entre a BCPG e a PL, logo estes tiveram que adquirir um número de *powr* que garantisse a liquidez de *sparkz* na rede. BCPG investiu numa quantidade e depositou como obrigação e a PL igualou esse depósito através dos *powr* que detém, guardados na chamada Piscina de Crescimento. A quantidade exata não foi disponibilizada publicamente.

A Piscina de crescimento é onde a PL guarda todos os *powr tokens* que detém, adquiridos aquando da criação da plataforma e através da cobrança de pequenas taxas em

cada transação P2P. Os *powr tokens* armazenados na Piscina de Crescimento além de servirem para a participação neste tipo de projetos, servem para distribuir incentivos a participantes que contribuem para o bom funcionamento da rede.

Na imagem abaixo encontra-se uma representação do funcionamento do negócio [57].

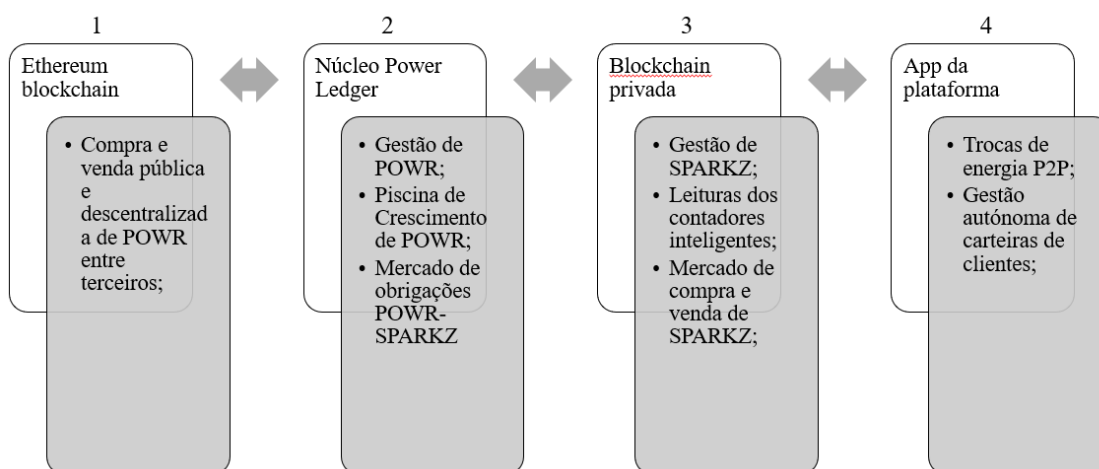
Figura 4.5: Representação do funcionamento do negócio



Os consumidores pré-compram *sparkz* dos anfitriões da rede através de pagamentos na moeda local. Os consumidores depois utilizam esses *sparkz* para comprar energia aos produtores-consumidores que desejam vender o excedente da energia produzida. Dando continuação ao exemplo mencionado acima, se o valor do kilowatt hora na plataforma é 10 centavos, então 10 *sparkz* são enviados para o produtor-consumidor cada vez que um kilowatt hora é consumido. Depois, os produtores-consumidores devolvem os *sparkz* ao anfitrião da rede em troca de um pagamento na moeda local ou armazenam os *sparkz* para poderem comprar energia a outros produtores-consumidores. Por cada transação energética entre consumidor e produtor-consumidor, é cobrada uma taxa em *sparkz* que é paga ao anfitrião da rede [56].

A PL desenvolveu uma plataforma de mercado que pode ser dividida em 4 níveis.

Figura 4.6: Representação da divisão da plataforma de mercado por níveis



Nível 1 - *Blockchain* pública em Ethereum

Foi através desta *blockchain* pública que a BCPG efetuou a compra dos *powr tokens* pré-estabelecidos no acordo com a Power Ledger. Este nível é público e completamente descentralizado e é onde o sistema de informação interage com mercados utilizados por terceiros. A *blockchain* pública e os mercados de terceiros estão fora do controlo da PL e permitem a maior segurança e descentralização possível ao *powr token*.

Nível 2 - Núcleo Power Ledger

O núcleo Power Ledger é o nível onde se encontram os contratos de obrigações inteligentes e onde se efetua a troca *powr/sparkz*. A piscina de crescimento está também neste nível. Este núcleo é fulcral para definir os acessos à plataforma.

Nível 3 - *Blockchain* privada

A PL desenvolveu uma *DApp* baseada em *blockchain*. A *DApp* usa uma *blockchain* privada, com o método de consenso Proof of Stake (explicado na secção 2.4.3.2) desenvolvida pela empresa e testada em mercados energéticos na Austrália durante os anos de 2016 e 2017 [59].

O registo dos dados dos contadores inteligentes é feito nesta *blockchain* e o SCVM está inserido a este nível também.

O cruzamento através de algoritmos matemáticos das leituras dos contadores com alguns dos conjuntos de informação provenientes do nível 4, permitem a criação autónoma de contratos inteligentes para a compra e venda de energia.

Assim que o contrato inteligente estabelece a correspondência entre uma oferta de compra e uma oferta de venda, a transação é desencadeada e verificada pela PL. O novo bloco contém as leituras que determinaram as ofertas, as preferências dos envolvidos e o estabelecimento da transação financeira. A nível físico, a energia comprada é introduzida na rede.

O mecanismo de mercado aplicado neste caso de estudo é igual ao explicado no caso de estudo anterior, representado na figura 4.4. O mecanismo de mercado é constituído por um registo de ordens de compra e venda com uma janela temporal finita de 15 minutos, em que ao final desta, todas as ofertas de compra e venda são apagadas.

As ordens de compra são definidas pelo limite de preço que os participantes estão dispostos a pagar. O valor das ordens de venda é definido pelo custo marginal de cada uma das FER, ou seja, o painel fotovoltaico que está a apresentar a melhor produção tem o preço mais baixo. Os consumidores que estão dispostos a pagar mais são alocados à ordem de venda mais baixa, e os consumidores dispostos a pagar menos são alocados às restantes. O valor da última ordem de compra alocada representa o preço de mercado no fim daquela janela temporal.

Nível 4 - *App* da plataforma

É o nível com o qual os participantes da rede podem interagir. Os detalhes das leituras dos contadores inteligentes são registados em intervalos de 15 minutos e são disponibilizados na *App* quase em tempo-real. Os consumidores podem definir a sua disposição a pagar pela energia renovável local e têm acesso aos preços praticados em momentos anteriores. Todas as transações registadas no nível 3, são expostas na *App* assim que consumadas, permitindo a criação de um rastro seguro, confiável e acessível a todos os participantes.

4.4.2.3 Papel do Operador de Distribuição

Como este projeto tem um carácter pioneiro e serve como uma experiência inovadora de mercados locais energéticos na Ásia, o operador de distribuição público garantiu a utilização gratuita da rede principal.

4.5 Avaliação do Caso de Estudo 2

Considerando os fatos apontados na secção 4.4, foi possível fazer a análise dos requisitos formulados no capítulo 3 para a microrede projetada em Banguetcoque pela PL e pela BCPG. No fim da secção é realizada a avaliação da microrede através da ferramenta criada e a respetiva análise SWOT.

4.5.1 Enquadramento do negócio

1. A microrede tem uma proposta de valor forte?

A proposta de valor deste projeto é a sustentabilidade ambiental, a eficiência energética, a melhoria económica do fornecimento de energia e a autonomia da comunidade da região T77.

Tendo em conta a envolvente externa atual, em que a sustentabilidade é uma prioridade constante e que a eficiência é uma forma de a atingir, a proposta de valor da microrrede pode incitar bastante interesse das comunidades locais.

2. A microrrede tem um modelo de negócio adequado?

A PL e a BCPG são anfitriões da rede e neste caso funcionaram como facilitadores da rede. Segundo a representação do funcionamento do negócio feita em 4.5, a BCPG e PL como anfitriões da rede são recompensadas através da cobrança de uma taxa por cada transação. Esta é a fonte de receita dos anfitriões da rede. A taxa cobrada diminui à medida que a rede for aumentando. Os produtores-consumidores geram receita através da energia renovável local produzida em excesso. Os consumidores têm a hipótese de poupar na compra de energia renovável local.

De qualquer forma, devido ao carácter inovador do projeto e ao apoio público que foi dado a este, a empresa de energia da região (MEA) ofereceu a utilização da rede principal, sobre a qual estes têm o controlo total. As empresas de energia vão continuar a existir e é necessário encontrar um papel para estas nas microrredes.

Com o desenvolvimento do projeto, o modelo de negócio deverá enquadrar a empresa de energia.

3. O objetivo da microrrede vai ao encontro aos objetivos dos participantes?

O objetivo dos participantes locais é uma combinação entre ganho financeiro, desenvolvimento de fontes de energia sustentáveis e aumentar a autonomia e o poder da comunidade. Como projeto piloto e a favor da comunidade, esta o objetivo da microrrede vai de encontro ao objetivo dos participantes.

Segundo [55], foi possível aos consumidores pouparem cerca de 5 % na conta da eletricidade. Durante o período em que o projeto esteve a decorrer, a escola envolvida exportou cerca de 545 Kwh durante um fim-de-semana. Num acordo entre a BCPG e a escola, todos os lucros serão utilizados em iniciativas educacionais sobre sustentabilidade. Contudo, se a escola tivesse retido os lucros, ganhariam cerca de 80 dólares australianos ao longo do fim-de semana.

A plataforma de mercado desenvolvida deu oportunidade aos consumidores de definir a origem da energia comprada e o destino da energia vendida, o preço de compra e o preço de venda. Esta permitiu uma participação ativa dos participantes no fornecimento de energia local.

4. A microrrede integra a troca de energia P2P com os processos dos *stakeholders*?

Sim. Os *stakeholders* são a BCPG, a PL, a MEA e os participantes. A BCPG foi responsável pela preparação da camada física da microrrede, a PL pela camada virtual e a MEA permitiu a utilização da rede principal para o transporte de energia. A troca de energia entre participantes não seria possível sem a interligação dos processos criados pelas três empresas.

4.5.2 Componentes da microrede

4.5.2.1 Hardware

5. Existem pontos de ligação à rede principal?

Sim, além da instalação dos painéis, a BCPG realizou a ligação destes à rede principal controlada pela MEA.

6. Existe uma microrede física?

Não, a BCPG utiliza unicamente a rede principal, ou seja, em caso de corte da distribuição, os edifícios que fazem parte da microrede também ficarão sem energia.

7. A microrede contém um sistema avançado de contadores inteligentes?

A PL apenas trabalha com contadores inteligentes que vão de encontro aos requisitos impostos na norma ANSI C-12.1-2008. Segundo esta norma, a precisão mínima do contador tem de ser 2 %. Assim, a BCPG instalou contadores que vão encontro à norma referida. Os contadores realizam a leitura das grandezas necessárias e comunicam entre si e com a *blockchain* através de IoT.

4.5.2.2 Software

SCVM

8. Existe um SCVM na microrede?

A PL desenvolveu o seu próprio algoritmo de criação automática de ofertas de compra e venda baseadas nas leituras da produção e consumo de energia renovável local. O algoritmo está incluído na *DApp* do nível 3.

Sistema de Informação do mercado

9. O acesso à informação é adequado?

A *blockchain* do nível 3 criada pela PL é privada e não permite a participação dos membros da microrede no processo de verificação dos blocos, contudo, é permitido o acesso de leitura a todos os participantes, ou seja, os consumidores e os produtores-consumidores podem acompanhar as transações do mercado, consultar os preços que estão a ser licitados, as leituras e as preferências que originaram aquela licitação.

10. Contém um sistema de estabelecimento de transações autónomo?

Considerando as ofertas automáticas criadas no SCVM e as preferências dos utilizadores, são criados os contratos inteligentes que são registados no nível 3. Assim que existir uma correspondência que esteja de acordo com o mecanismo de mercado e com as preferências pré-definidas, o contrato inteligente é celebrado e a transferência de energia em troca de *sparkz* é realizada.

11. Foi implementado um mecanismo de contabilização de bens físicos?

Sim, foi implementado um sistema de dois *tokens*: *powr* e *sparkz*. O *powr* funciona com um *token* público global que permite o acesso à utilização da plataforma para gestão virtual de uma microrrede, ou seja, se uma empresa de energia ou se uma comunidade local quiser utilizar a tecnologia da PL para gerir a sua própria microrrede, tem de comprar *powr tokens* suficientes para alimentar o número de participantes na rede.

O *sparkz* é o *token* único de cada mercado local, através do qual são realizadas as trocas de energia entre produtores e consumidores. Os *sparkz* representam o valor em *tokens* de uma unidade da moeda local. Se $1 \text{ sparkz} = 0.01 \text{ €}$ e $1 \text{ KWh} = 0.1 \text{ €}$, então é realizada uma transação de 10 *sparkz* em troca de 1 KWh.

A interação entre anfitrião da rede e os participantes é toda contabilizada através da troca de *sparkz*. Portanto, mais uma vez, a informação referente à transação de *sparkz* é um bem valioso que permite determinar os consumos e as produções locais, e consequentemente, pode ser utilizada para a realização da gestão de procura e consumo.

12. Contém um sistema de realização de transações independente de terceiros?

A taxonomia privada do nível 3 implica que haja apenas um decisor no processo de verificação das transações. Considerando que o método de consenso é o PoS, e como o anfitrião da rede é o maior detentor do *sparkz*, a verificação das transações é realizada sempre pela PL. Este método de consenso não permite uma gestão descentralizada da microrrede, com o *input* de, pelo menos, uma parte dos participantes.

Pela observação da 4.5, as transações monetárias são realizadas entre o consumidor e anfitrião e entre anfitrião e produtor-consumidor. Existe uma transferência monetária feita através dos métodos tradicionais totalmente centralizada no anfitrião da microrrede.

O anfitrião da rede permite a troca direta de energia entre participantes, contudo, controla todos os processos inerentes a essa troca.

Como o objetivo, é permitir a troca de energia P2P sem a intervenção de um terceiro partido, considero que o sistema de informação consenso não é independente de terceiros.

13. A latência das transações é adequada?

O fato da *blockchain* ser privada tem uma vantagem: as transações são verificadas por um algoritmo central, o que torna o processo significativamente mais rápido e mais eficiente.

14. Existe uma aplicação para o utilizador?

Sim, o nível 4 da plataforma virtual criada pela PL inclui um aplicação dedicada ao utilizador final em que este pode definir as suas preferências de consumo e de geografia das FER e acompanhar o mercado quase em tempo real.

4.5.3 Comunicação entre *Software* e *Hardware*

15. Existe interoperabilidade entre os componentes da microrede?

Segundo [55], a primeira troca energética foi realizada em Outubro de 2018. Através do trabalho desenvolvido em conjunto pela parceria entre a BCPG e a PL, foi possível a interoperabilidade entre os painéis fotovoltaicos, os contadores inteligente e o sistema de informação.

4.5.4 Troca de Informação

16. Existe um modelo padrão de informação para as leituras dos contadores inteligentes?

Os contadores inteligentes comunicam diretamente com o nível 3 da plataforma virtual criada pela PL, que é suportado pela *blockchain*. Ainda não existe um modelo padrão de comunicação com a *blockchain*.

17. Existe um modelo padrão de informação para a comunicação entre o SCVM e o sistema de informação?

Tal como na MRB, ainda não existe um modelo padrão de informação para *blockchain*, o que faz, com que sempre que se desencadeia uma alocação de ofertas, os dados têm de ser decodificados e reinterpretados por forma a dar início à respetiva transação.

4.5.5 Funcionamento do mercado

18. O mercado tem um mecanismo de funcionamento?

O mecanismo de funcionamento é o mecanismo de leilão, em que quem está disposto a pagar mais é alocado às ofertas de venda de energia local mais baixas. Os pagamentos são realizados pelo consumidor ao anfitrião da rede e depois transferidos para o produtor-consumidor.

19. A microrede tem um mecanismo de definição de preço?

O preço da última alocação antes do fecho do leilão, é o preço de mercado no momento. De 15 em 15 minutos, o preço de mercado é atualizado, permitindo a prática de um preço objetivo e que retrata com exatidão as condições de mercado.

20. O mecanismo de mercado é eficiente?

Devido ao fato de estarmos perante uma *blockchain* privada, o processo de realização de transações é eficiente em termos energéticos e de latência.

Esta microrrede foi desenvolvida num contexto experimental e, atualmente, inclui exclusivamente 4 produtores-consumidores. Como todos os participantes estavam habilitados a comprar e a vender energia, o preço desta não era relevante. Assim, foi possível uma distribuição de energia equilibrada sem exclusões.

4.5.6 Regulamentação

21. Foi criada regulamentação específica para a implementação da microrrede?

Não foi desenvolvida qualquer regulamentação específica para a microrrede.

22. O governo local apoiou a implementação da microrrede?

A empresa responsável pela distribuição na região T77 é uma entidade pública controlada pelo Estado. No sentido de observar a tecnologia de trocas energéticas P2P em prática e analisar a sua viabilidade, o Governo tailandês disponibilizou a utilização da rede de distribuição principal e o apoio de manutenção da empresa de energia.

23. Existe influência positiva de regulamentação externa?

Atualmente, apenas 10 % da energia produzida na Tailândia vem de fontes renováveis, com uma capacidade total de 45000 MW. O PDP 2018–2037 foi aprovado pelo *National Energy Policy Council* em Janeiro de 2019 e define as seguintes metas de produção energética até 2037: 53% da produção energética do país deve vir do gás natural, 37% de energia renovável e 10% de carvão. A atual capacidade energética solar na Tailândia é cerca de 3300 MW (duplicou desde 2014) e para atingir as metas do PDP, o Governo definiu o aumento da produção de energia através de painéis fotovoltaicos para 6000 MW até 2037 [7].

O Governo tailandês tem vindo a mostrar vontade em adotar tecnologias inovadoras e está a abrir as portas à entrada de empresas privadas no desenvolvimento do setor energético. O mercado energético tailandês pode ser visto como um oligopólio, cujo controlo passa pelas mãos da *Energy Regulatory Commission*. Nas últimas três décadas, esta entidade fiscalizadora tem vindo a definir regulamentos e termos que obrigam a que apenas possa haver um comprador de energia na Tailândia, a EGAT. A abertura à entrada de empresas privadas dedicadas a trocas energéticas P2P, como a PL, pode ser vista como uma tentativa de disrupção do sistema tradicional, no sentido de descentralizar a gestão dos utilitários no país [38].

Ainda, ao longo dos últimos 4 anos, o Gabinete de Políticas Energéticas e Planeamento tailandês já realizou sete conferências sobre microrredes. As entidades públicas estão interessadas em regular o aparecimento das microrredes, de forma a

prevenir perturbações no setor energético e a garantir um crescimento controlado da aplicação.

4.5.7 Aplicação da ferramenta de avaliação

Através da observação da tabela 4.3, podemos ver que a microrede da T77 tem uma avaliação final de 73.91 %. A propriedade com melhor avaliação é o “Funcionamento do mercado”, de 100 %. O funcionamento do mercado adequa-se perfeitamente ao contexto local. A maior lacuna desta microrede é a propriedade “Troca de informação”, com uma avaliação de 0%. Enquanto não existir um modelo padrão de informação de comunicação com a *blockchain*, esta propriedade não pode ser melhorada.

4.5.8 Análise SWOT

A partir da avaliação realizada em 4.5.7, foi possível identificar os pontos fortes e os pontos fracos, a nível interno, e as oportunidades e as ameaças, a nível externo, da microrede da T77, representados na tabela 4.4.

4.5.8.1 Forças

A microrede da T77 contém um sistema avançado de contadores inteligentes, um sistema de estabelecimento de transações autónomo, um mecanismo de contabilização de bens físicos e uma *App* para utilizador final cuja interoperabilidade permite o funcionamento da microrede.

Como a *blockchain* dedicada às transações dos *tokens* é privada, a verificação das transações é feita de forma centralizada. Tal característica permite uma latência de transações adequada e consequentemente, um mecanismo de mercado eficiente.

4.5.8.2 Fraquezas

O modelo de negócio não enquadra a entidade pública responsável pela distribuição. Uma nova arquitetura de negócio deve ser desenvolvida, de forma a introduzir o Estado no funcionamento do mercado.

A microrede da T77 não possui uma microrede física e depende totalmente do sistema de distribuição principal. No caso de corte do sistema de distribuição principal, os participantes também ficam sem energia.

A arquitetura de mercado desenvolvida pela PL, implica que os pagamentos monetários sejam feitos primeiramente ao anfitrião da rede, e depois transferidos para os produtores-consumidores, ou seja, não há uma transação de bens direta entre produtor e consumidor.

A centralização dos processos implica a utilização de uma maior número de processos e recursos, o que não contribui para a eficiência da microrede.

Tabela 4.3: Aplicação da ferramenta de avaliação à microrede da T77

Enquadramento do negócio				
Subpropriedades	Avaliação	Avaliação/subpropriedade(%)	Avaliação da microrede(%)	
1.Proposta de valor forte	1			
2.Modelo de negócio adequado	0	75.00	13.04	
3.Objetivo da microrede vai de encontro ao objetivo dos participantes	1			
4.Integração com os processos dos stakeholders	1			
Componentes da microrede				
Hardware (1)	5.Pontos de ligação à rede principal	1		
	6.Microrede física	0		
	7.Sistema avançado de contadores inteligentes	1		
Software (2)	8.SCVM	1		
	9.Acesso à informação adequado	1		
	10.Sistema de estabelecimento de transações autónomo	1	81.81	39.13
	11.Mecanismo de contabilização de bens físicos	1		
	12.Sistema de realização de transações independente de terceiros	0		
	13.Latência das transações adequada	1		
	14.App para o utilizador final	1		
	15.Interoperabilidade entre hardware e software	1		
Troca de informação				
Comunicação entre (1) e (2)	16.Modelo padrão de informação para as leituras dos contadores inteligentes	0	0	
	17.Modelo padrão de informação para a comunicação entre o SCVM e o sistema de informação	0		
Funcionamento do mercado				
	18.Mecanismo de mercado	1		
	19.Mecanismo de definição de preço	1	100	13.04
	20.Mecanismo de mercado eficiente	1		
Regulamentação				
	21.Criação de regulamentação específica da microrede	0		
	22.Apoios do governo à implementação da microrede	1	75	8.69
	23.Influência positiva de regulamentação externa	1		
				Total (%): 73.91%

Tabela 4.4: Análise SWOT da microrrede da T77

Ambiente Interno	Forças	Fraquezas
	<ul style="list-style-type: none"> -Proposta de valor; -Objetivo da microrrede; -Integração com os processos dos stakeholders; -Pontos de ligação à rede principal; -Sistema avançado de contadores inteligentes; -Interoperabilidade entre hardware e software; -Acesso à informação adequado; -Sistema de estabelecimento de transações autônomo; -Mecanismo de contabilização de bens físicos; -App para o utilizador final; -Latência de transações adequada; -Mecanismo de mercado eficiente; 	<ul style="list-style-type: none"> -Modelo de negócio inadequado; -Inexistência de microrrede física; -Sistema de realização de transações centralizado; -Ausência de modelo padrão de comunicação entre o SCVM e o sistema de informação; -Ausência de modelo padrão de comunicação entre os contadores inteligentes e o sistema de informação;
Ambiente Externo	Oportunidades	Ameaças
	<ul style="list-style-type: none"> -Desenvolvimento de modelos padrão de comunicação com a blockchain; -PDP 2018-2037; -Interesse do Governo na regulação de microrredes; -Interesse do Governo na aplicação de tecnologias inovadoras; -Aceitação de empresas privadas no setor energético; -Apoio público na realização da distribuição; -Localização geográfica da microrrede; 	<ul style="list-style-type: none"> -Custos de instalação de painéis fotovoltaicos; -Falta de informação sobre a tecnologia que suporta a microrrede; -Centralização total da microrrede;

Ainda, o sistema de transações de *tokens* é baseado numa *blockchain* privada em que os blocos são verificados pela PL, o que implica que os participantes não podem ter influência sobre o comportamento da microrrede.

4.5.8.3 Oportunidades

O PDP 2018-2037 visa o aumento da capacidade de produção energética renovável na Tailândia de 10% para 37% nos próximos 15 anos. A instalação de painéis fotovoltaicos nos edifícios de Bangucoque pode contribuir para atingir a meta do PDP e para o desenvolvimento da microrrede, já que podem vir a surgir novos produtores-consumidores e consumidores.

O Governo da Tailândia está a tentar mudar o sistema tradicional de fornecimento energético. Como tal, está a investigar novas tecnologias e a abrir portas ao investimento privado. Um dos principais interesses atuais do Governo é a aplicação de microrredes energéticas P2P, o que pode contribuir para o apoio ao crescimento do projeto.

A prova disso é que o Governo Tailandês permitiu a utilização do sistema de distribuição principal da região. No caso de expansão, não é necessário o gasto de recursos no desenvolvimento de infraestrutura para executar a distribuição na microrrede, pois é permitida a utilização da rede já existente.

A microrrede está instalada na zona T77 de Bangucoque. Esta zona é conhecida como uma comunidade residencial no centro de Bangucoque apenas acessível aos habitantes com maior poder económico. Como referido em 2.3.1, os indivíduos com maior poder económico tem tendência a ter uma maior consciência ambiental. Portanto, os habitantes da zona vão ter interesse no desenvolvimento da microrrede.

4.5.8.4 Ameaças

Devido ao funcionamento do mercado da microrrede, existe um controlo central exercido pelos anfitriões da rede, BCPG e PL. A BCPG controla os contadores inteligentes, a PL controla a plataforma virtual e as transações entre participantes usam o anfitrião da rede como intermediário e são verificadas pela PL. No fim de contas, o sistema aplicado, tal como o sistema tradicional, está exposto à centralização da informação. Se acontecer a manipulação da rede física e a consequente manipulação da informação e dos preços, os consumidores podem não estar a ser expostos às reais condições de mercado e acabam por não ter qualquer controlo e autonomia no mercado. Tal característica pode causar o desinteresse de possíveis futuros membros da comunidade.

Mais uma vez, a falta de informação relativamente à microrrede pode também ser um fator de ameaça ao desenvolvimento da microrrede da T77.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Através da ferramenta de avaliação foram identificadas 5 propriedades da microrredes energéticas P2P: o enquadramento do negócio, os componentes da microrrede, a troca de informação na microrrede, o funcionamento do mercado e por fim, a regulamentação aplicada.

A aplicação da ferramenta aos casos de estudo realizada no capítulo 4 permitiu a caracterização quantitativa de cada uma das propriedades e subpropriedades identificadas. Através da caracterização quantitativa, foi possível a identificação dos pontos fortes, dos pontos fracos, das oportunidades e das ameaças ao desenvolvimento das microrredes energéticas em estudo.

Nas avaliação das subpropriedades associadas às primeiras 4 propriedades, se a avaliação fosse 0, a subpropriedade era considerada um ponto fraco. Se a avaliação fosse 1, era considerada uma força da microrrede. Portanto, as primeiras 4 categorias diziam respeito à avaliação do ambiente interno da microrrede energética. A identificação de oportunidades e ameaças externas à microrrede energética foi realizada com base na avaliação quantitativa de todas as propriedades.

A aplicação da ferramenta permitiu o dimensionamento em percentagem do desenvolvimento realizado até hoje em cada uma das microrredes energéticas estudadas. Supostamente, com o dimensionamento de cada uma é possível realizar uma comparação quantitativa entre as duas microrredes em estudo, identificando as propriedades com maior percentagem de uma relativamente à outra.

A MRB apresenta uma avaliação da “Regulamentação” de 33.33% enquanto a microrrede da T77 tem uma avaliação de 75%. Esta avaliação demonstra que o Governo Tailandês está mais interessado no desenvolvimento da microrrede da T77 e está a tomar medidas para apoiar este. Neste caso, a comparação quantitativa faz sentido.

Na propriedade “Funcionamento do mercado” a MRB tem uma avaliação de 66.67%

enquanto a microrede da T77 tem uma avaliação de 100%. A diferença entre estas avaliações é principalmente determinada pelo fato da MRB ter um número de participantes muito maior do que a microrede em Bangucoque. O número de participantes e a geografia da microrede não são fatores considerados na aplicação da ferramenta, contudo estes influenciam a avaliação.

Considerando isto, a ferramenta de avaliação criada não pode ser aplicada com o intuito de realizar a comparação quantitativa entre microredes energéticas P2P, a não ser que estas tenham sido desenvolvidas em condições geográficas e demográficas semelhantes. Na ferramenta deveriam ter sido consideradas características geográficas e demográficas, que permitissem a avaliação imparcial das microredes.

Portanto, a ferramenta deve ser aplicada só no sentido de contribuir para a identificação dos pontos fortes, os pontos fracos, as oportunidades e as ameaças, e consequentemente para a determinação do posicionamento estratégico da microrede energética em estudo. Pode ser utilizada para comparação entre microredes, mas apenas em termos qualitativos.

Como prova de que a ferramenta aplicada pode ser utilizada para comparação qualitativa entre microredes, apresento a tabela 5.1, em que foi realizada uma comparação qualitativa operacional entre o sistema energético tradicional, a MRB e a microrede da T77.

No capítulo 1 foram mencionados 5 atributos operacionais inerentes aos sistemas energéticos, nomeadamente:

- Transparência de Informação;
- Fiabilidade de Informação;
- Eficiência energética;
- Eficiência de processos;
- Poder do consumidor;

Estes atributos são características intrínsecas dos sistemas energéticos. A caracterização da transparência de informação num sistema energético passa pela identificação do responsável pela gestão da informação e velocidade com que esta é partilhada com os consumidores. A fiabilidade de informação passa pela identificação do responsável pela verificação da informação, ou seja, se esta é realizada um a um nível centralizado ou descentralizado. A eficiência energética é caracterizada pela forma como a energia é transportada entre consumidores do sistema. A eficiência de processos inclui a análise da autonomia destes e a identificação do responsável por estes. E por fim, o poder do consumidor é qualificado através da análise da participação deste na microrede.

O resultado da aplicação da ferramenta nas primeiras 4 propriedades permitiu a realização de inferências qualitativas acerca de cada um dos atributos mencionados acima.

Na tabela 5.1 é possível observar a comparação qualitativa operacional entre o sistema energético tradicional e as microrredes em estudo.

Tabela 5.1: Comparação entre sistemas energéticos

	Sistemas Energéticos		
	Sistema tradicional	Microrrede de Brooklyn	Microrrede da T77
Transparência de Informação	A gestão da informação é realizada unicamente pela entidade utilitária	A gestão da informação é partilhada entre todos os participantes e é atualizado quase em tempo-real	A gestão da informação é partilhada entre todos os participantes e é atualizado quase em tempo-real
Fiabilidade da informação	A informação é verificada unicamente pela entidade utilitária	A informação é verificada a um nível distribuído pelos participantes	A informação é verificada a um nível centralizado pelo anfitrião da rede
Eficiência energética	A energia é dissipada no processo de transporte	O excesso de energia é automaticamente distribuído pela procura local	O excesso de energia é automaticamente distribuído pela procura local
Eficiência de Processos	Os processos não se realizam autonomamente e são dispensáveis	Os processos realizam-se de forma autónoma diretamente entre participantes	Os processos realizam-se de forma autónoma, com a intervenção do anfitrião da rede
Poder do consumidor	O consumidor não tem uma participação ativa na microrrede	O consumidor tem uma participação ativa na microrrede	O consumidor não tem uma participação ativa na rede

Pela análise da tabela é possível retirar as seguintes conclusões:

- A transparência da informação é maior nas microrredes energéticas do que no sistema energético tradicional;
- A MRB é o único sistema energético em que a informação é verificada de forma descentralizada;
- A eficiência energética é maior nas microrredes energéticas do que no sistema energético tradicional;
- A eficiência de processos é maior nas microrredes energéticas, do que no sistema energético tradicional;
- A MRB é o único sistema energético em que o consumidor tem uma participação ativa na microrrede;

A aplicação da ferramenta providenciou a informação base que possibilitou as conclusões listadas acima.

Portanto, em conclusão da discussão de resultados, a análise SWOT realizada comprovou positivamente a utilidade da aplicação da ferramenta criada. Como mostrado na tabela 5.1, a ferramenta também pode ser útil na comparação qualitativa entre sistemas energéticos. Contudo, é importante notar que, a ferramenta não deve ser aplicada para a comparação quantitativa entre microrredes energéticas P2P, visto não considerar fatores geográficos e demográficos.

CONCLUSÃO

As microrredes energéticas P2P são uma tendência no mercado energético, e é importante definir o posicionamento estratégico destas no enquadramento geral do mercado.

As características da microrrede da T77 permitem a troca de energia P2P mas com recurso à intervenção de um agente central. A eficiência de processos é maior comparativamente ao sistema energético tradicional, mas apenas devido, à digitalização e automação dos processos do negócio. Os pontos fortes e as fraquezas permitem concluir que o funcionamento de mercado e o modelo de negócio da microrrede da T77 se adequa a comunidades privadas em que os participantes são conhecidos entre si e que estão dispostas a depositar o controlo da microrrede nas mãos de um agente central.

Por exemplo, o funcionamento de mercado da microrrede da T77 adequa-se perfeitamente ao fornecimento energético de condomínios privados. Deveria ser instalada uma microrrede física para a distribuição de energia e realizada a conexão entre esta e os painéis fotovoltaicos com os contadores inteligentes instalados nos telhados de cada edifício. A entidade responsável pela gestão do condomínio assumiria o papel de anfitrião da rede e seria responsável pela plataforma virtual de mercado. Como a identidade de cada membro era partilhada entre moradores do condomínio e existe um registo distribuído de todas as ações, a segurança da microrrede está garantida. Através da comunicação entre os contadores inteligentes e o sistema de informação autónomo desenvolvido pela PL, as transações realizar-se-iam autonomamente consoante a produção e os consumos dos moradores.

É possível concluir que o interesse da PL é ir ao encontro dos interesses das empresas de energia. A forma como desenvolveram a sua tecnologia está a incentivar ao desenvolvimento de microrredes energéticas controladas pela entidade que gere a rede de distribuição. A tecnologia não foi desenvolvida no sentido de eliminar o papel centralizado dos operadores de distribuição, mas sim, no sentido de encontrar um novo posicionamento

para estes num sistema digital e autónomo.

A microrede de Brooklyn desenvolvida pela LO3 Energy permitiu a digitalização e automatização do sistema energético num regime descentralizado com participação ativa dos consumidores. A LO3 Energy desenvolveu hardware com poder computacional para o desempenho autónomo de funções como, leitura dos contadores inteligentes, determinação de ofertas de compra e venda e verificação de transações. O método de consenso aplicado garante a segurança e a fiabilidade da informação, com base no contributo dos participantes com maior investimento a nível de infraestrutura.

A implementação da MRB está assente em princípios como a anonimidade dos participantes, a colaboração entre membros da comunidade na procura do bem geral e a recompensa aos participantes que contribuem ativamente para o funcionamento da microrede.

Relativamente ao posicionamento de mercado da MRB, conclui-se que a tecnologia aplicada está a ir no sentido da disrupção do mercado energético centralizado e está a contribuir para o fortalecimento das comunidades locais e do consumidor individual, ao mesmo tempo, que permite a eficiência energética e de processos.

Da mesma forma que a introdução dos serviços de partilha de veículos como a Uber no setor dos transportes públicos, ou o serviço de partilha de hospedagem como o AirBnB no setor da hospedagem local contribuíram para a expansão do respetivo mercado com a criação de uma nova vertente de negócio, as microrredes energéticas P2P têm potencial para expandir o mercado energético. Em paralelo com a construção de fontes de energia renovável em grande escala por parte das empresas de energia que permitam o fornecimento energético de grandes cidades, as microrredes energéticas P2P suportadas pela *blockchain* podem ser aplicadas a pequenas comunidades locais dentro da cidade.

Com o desenvolvimento da IoT, da *blockchain* e da interoperabilidade entre estes, o desempenho operacional das microrredes energéticas P2P melhorará, e será possível a aplicação desta tecnologia a nível comercial.

6.0.1 Contribuições

A principal contribuição desta dissertação foi a criação da ferramenta representada em 3.6, que permite a avaliação de microrredes energéticas P2P. Como experimentado, a aplicação desta permitiu a realização de uma análise SWOT completa e fundamentada.

Além desta, foram identificadas as principais propriedades de uma microrede e os desafios operacionais das microrredes energéticas P2P.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. M. Adil e Y. Ko. “Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (2016), pp. 1025–1037.
- [2] N. Z. Aitzhan e D. Svetinovic. “Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams”. Em: *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing* 15.5 (2016), pp. 840–852.
- [3] E. Al Kawasmi, E. Arnautovic e D. Svetinovic. “Bitcoin-based decentralized carbon emissions trading infrastructure model”. Em: *Systems Engineering* 18.2 (2015), pp. 115–130.
- [4] K. Alanne e A. Saari. “Distributed energy generation and sustainable development”. Em: *Renewable and sustainable energy reviews* 10.6 (2006), pp. 539–558.
- [5] A. Ali, W. Li, R. Hussain, X. He, B. Williams e A. Memon. “Overview of current microgrid policies, incentives and barriers in the European Union, United States and China”. Em: *Sustainability* 9.7 (2017), p. 1146.
- [6] M. Andoni, V. Robu, D. Flynn, S. Abram, D. Geach, D. Jenkins, P. McCallum e A. Peacock. “Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 100 (2019), pp. 143–174.
- [7] N. Banerjee. “Spotlight Activity: Thailand’s New Policy Strengthens Renewables and Reduces Coal”. Em: *Climate Scorecard* (2019). URL: <https://www.climatescorecard.org/2019/05/thailands-new-policy-strengthens-renewables-and-reduces-coal/> (acedido em 10/09/2019).
- [8] V. Bertsch, M. Hall, C. Weinhardt e W. Fichtner. “Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: Empirical insights for Germany”. Em: *Energy* 114 (2016), pp. 465–477.
- [9] Bitshares. “Delegated Proof-of-Stake Consensus”. Em: (). URL: [/bitshares.org/technology/delegated-proof-of-stake-consensus/](https://bitshares.org/technology/delegated-proof-of-stake-consensus/) (acedido em 26/05/2019).

- [10] C. Block, D. Neumann e C. Weinhardt. “A market mechanism for energy allocation in micro-chp grids”. Em: *Proceedings of the 41st Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2008)*. IEEE. 2008, pp. 172–172.
- [11] B. K. Blyden, W.-J. Lee e V. D. Perryman. “An assessment of microgrid based integratable technologies as a strategic dynamic for accelerated and sustainable economic growth”. Em: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. IEEE. 2008, pp. 1–5.
- [12] K. Bódis, I. Kougias, A. Jäger-Waldau, N. Taylor e S. Szabó. “A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 114 (2019), p. 109309.
- [13] K. Boroojeni, M. H. Amini, A. Nejadpak, T. Dragičević, S. S. Iyengar e F. Blaabjerg. “A novel cloud-based platform for implementation of oblivious power routing for clusters of microgrids”. Em: *Ieee Access* 5 (2016), pp. 607–619.
- [14] B. Brandherm, J. Baus e J. Frey. “Peer Energy Cloud–Civil Marketplace for Trading Renewable Energies”. Em: *2012 Eighth International Conference on Intelligent Environments*. IEEE. 2012, pp. 375–378.
- [15] S. Buchko. “How Long do Bitcoin transactions take?” Em: *Coin Central* (2017). URL: coincentral.com/how-long-do-bitcoin-transfers-take/ (acedido em 15/05/2019).
- [16] C Burger, A Kuhlmann, P Richard e J Weinmann. “Blockchain in the energy transition. A survey among decision-makers in the German energy industry”. Em: *DENA German Energy Agency* (2016).
- [17] J. B. Bushnell e S. S. Oren. “Bidder cost revelation in electric power auctions”. Em: *Journal of regulatory economics* 6.1 (1994), pp. 5–26.
- [18] A. Castor. “A (Short) Guide to Blockchain Consensus protocols”. Em: *Coindesk* (2017). URL: www.coindesk.com/short-guide-blockchain-consensus-protocols (acedido em 05/06/2019).
- [19] S. G. C. CEN-CENELEC-ETSI. Group, “*Smart Grid Reference Architecture*,” no. 2012.
- [20] V. N. Coelho, M. W. Cohen, I. M. Coelho, N. Liu e F. G. Guimarães. “Multi-agent systems applied for energy systems integration: State-of-the-art applications and trends in microgrids”. Em: *Applied energy* 187 (2017), pp. 820–832.
- [21] C. Colson e M. Nehrir. “A review of challenges to real-time power management of microgrids”. Em: *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. IEEE. 2009, pp. 1–8.
- [22] S. Deetman. “Bitcoin Could Consume as Much Electricity as Denmark by 2020”. Em: *Vice* (2017). URL: www.vice.com/en_us/article/aek3za/bitcoin-could-consume-as-much-electricity-as-denmark-by-2020 (acedido em 23/07/2019).

-
- [23] I. Dincer. “Environmental impacts of energy”. Em: *Energy policy* 27.14 (1999), pp. 845–854.
- [24] L. Energy. *Exergy: Eletric Power Technical Whitepaper*. 2017.
- [25] L. Energy. *Exergy: Business Whitepaper*. 2018.
- [26] “Ethereum Wiki. Proof of staque FAQ”. Em: (). URL: github.com/ethereum/wiki/wiki/Proof-of-Stake-FAQ#what-is-proof-of-stake (acedido em 21/05/2019).
- [27] F. Farzan, S. Lahiri, M. Kleinberg, K. Gharieh, F. Farzan e M. Jafari. “Microgrids for fun and profit: The economics of installation investments and operations”. Em: *IEEE power and energy magazine* 11.4 (2013), pp. 52–58.
- [28] M. Franke, D. Rolli, A. Kamper, A. Dietrich, A. Geyer-Schulz, P. Lockemann, H. Schmeck e C. Weinhardt. “Impacts of distributed generation from virtual power plants”. Em: *International Sustainable Development Research Conference*. Vol. 11. 2005.
- [29] P. Frías, T. Gómez, R. Cossent e J. Rivier. “Improvements in current European network regulation to facilitate the integration of distributed generation”. Em: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 31.9 (2009), pp. 445–451.
- [30] R. Fujdiak, P. Mlynek, J. Slacik, J. Misurec, M. Voznak e M. Orgon. “Investigating the Suitability of Blockchain for Smart Grid”. Em: *2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. IEEE. 2019, pp. 1–6.
- [31] H. A. Gil e G. Joos. “Models for quantifying the economic benefits of distributed generation”. Em: *IEEE Transactions on power systems* 23.2 (2008), pp. 327–335.
- [32] A. Goranović, M. Meisel, L. Fotiadis, S. Wilker, A. Treytl e T. Sauter. “Blockchain applications in microgrids an overview of current projects and concepts”. Em: *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. 2017, pp. 6153–6158.
- [33] J. Green e P. Newman. “Citizen utilities: The emerging power paradigm”. Em: *Energy Policy* 105 (2017), pp. 283–293.
- [34] V Grewal-Carr e S Marshall. “Blockchain: Enigma. Paradox. Opportunity”. Em: *Deloitte, UK, Tech. Rep.* (2016).
- [35] H. A. W. Group. *Hyperledger Architecture, Volume 1*. Hyperledger Architecture Working Group., 2018.
- [36] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T.-L. Lee e P. C. Loh. “Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: Decentralized and hierarchical control”. Em: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60.4 (2012), pp. 1254–1262.
- [37] N. Hatziaargyriou, H. Asano, R. Iravani e C. Marnay. “Microgrids”. Em: *IEEE power and energy magazine* 5.4 (2007), pp. 78–94.

- [38] C.-S. Hong. “Thailand’s Renewable Energy Transitions: A Pathway to Realize Thailand 4.0”. Em: *The Diplomat* (2019). URL: <https://thediplomat.com/2019/03/thailands-renewable-energy-transitions-a-pathway-to-realize-thailand-4-0/> (acedido em 25/08/2019).
- [39] M. Iansiti e K. R. Lakhani. “The truth about blockchain”. Em: *Harvard Business Review* 95.1 (2017), pp. 118–127.
- [40] D. Ilic, P. G. Da Silva, S. Karnouskos e M. Griesemer. “An energy market for trading electricity in smart grid neighbourhoods”. Em: *2012 6th IEEE international conference on digital ecosystems and technologies (DEST)*. IEEE. 2012, pp. 1–6.
- [41] M. Jaradat, M. Jarrah, A. Bousselham, Y. Jararweh e M. Al-Ayyoub. “The internet of energy: smart sensor networks and big data management for smart grid”. Em: *Procedia Computer Science* 56 (2015), pp. 592–597.
- [42] J. Jimeno, J. Anduaga, J. Oyarzabal e A. G. de Muro. “Architecture of a microgrid energy management system”. Em: *European Transactions on Electrical Power* 21.2 (2011), pp. 1142–1158.
- [43] J. de Joode, J. Jansen, A. Van der Welle e M. Scheepers. “Increasing penetration of renewable and distributed electricity generation and the need for different network regulation”. Em: *Energy Policy* 37.8 (2009), pp. 2907–2915.
- [44] P. L. Joskow et al. *Lessons learned from the electricity market liberalization*. 2008.
- [45] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziaargyriou e A. Dimeas. “Microgrids management”. Em: *IEEE power and energy magazine* 6.3 (2008), pp. 54–65.
- [46] S. A. A. Kazmi, S. F. Hasan e D.-R. Shin. “Analyzing the integration of Distributed Generation into smart grids”. Em: *2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE. 2015, pp. 762–766.
- [47] W. Ketter, J. Collins e P. Reddy. “Power TAC: A competitive economic simulation of the smart grid”. Em: *Energy Economics* 39 (2013), pp. 262–270.
- [48] B. Kirpes, E. Mengelkamp, G. Schaal e C. Weinhardt. “Design of a Microgrid Local Energy Market on a Blockchain-Based Information System”. Em: (abr. de 2019).
- [49] O. Konashevych. “Advantages and current issues of blockchain use in microgrids”. Em: (2016).
- [50] G. Konstantopoulos. “Understanding Blockchain Fundamentals, Part 3: Delegated Proof of Stake”. Em: *Loom Network* (2018). URL: medium.com/loom-network/understanding-blockchain-fundamentals-part-3-delegated-proof-of-stake-b385a6b92ef (acedido em 02/06/2019).
- [51] P. Kou, D. Liang e L. Gao. “Distributed EMPC of multiple microgrids for coordinated stochastic energy management”. Em: *Applied energy* 185 (2017), pp. 939–952.

-
- [52] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papathanassiou e N. Hatziargyriou. “Making microgrids work”. Em: *IEEE power and energy magazine* 6.3 (2008), pp. 40–53.
- [53] E. Kuznetsova, Y.-F. Li, C. Ruiz e E. Zio. “An integrated framework of agent-based modelling and robust optimization for microgrid energy management”. Em: *Applied Energy* 129 (2014), pp. 70–88.
- [54] R. H. Lasseter. “Microgrids”. Em: *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309)*. Vol. 1. IEEE. 2002, pp. 305–308.
- [55] P. Ledger. “CASE STUDY: Learn more about our live project with BCPG in Bangkok, Thailand”. Em: *Medium* (2018). URL: <https://medium.com/power-ledger/case-study-learn-more-about-our-live-project-with-bcpg-in-bangkok-thailand-ab7a31c8b464> (acedido em 12/08/2019).
- [56] P. Ledger. “Common Questions and Misconceptions About Power Ledger”. Em: *Medium* (2018). URL: <https://medium.com/power-ledger/common-questions-and-misconceptions-about-power-ledger-8c7d0b819d7d> (acedido em 12/08/2019).
- [57] P. Ledger. “How does Power Ledger Make Money?” Em: *Medium* (2018). URL: <https://medium.com/power-ledger/q-how-does-power-ledger-make-money-67e07b7ee0c0> (acedido em 17/07/2019).
- [58] P. Ledger. “Power Ledger P2P Platform Goes Across the Meter with BCPG at T77 Precinct, Bangkok”. Em: *Medium* (2018). URL: <https://medium.com/power-ledger/power-ledger-p2p-platform-goes-across-the-meter-with-bcpg-at-t77-precinct-bangkok-62df5aba3d0a> (acedido em 13/08/2019).
- [59] P. Ledger. *Power Ledger Whitepaper*. 2018.
- [60] V. Lešić, A. Martinčević e M. Vašak. “Modular energy cost optimization for buildings with integrated microgrid”. Em: *Applied energy* 197 (2017), pp. 14–28.
- [61] I.-C. Lin e T.-C. Liao. “A Survey of Blockchain Security Issues and Challenges.” Em: *IJ Network Security* 19.5 (2017), pp. 653–659.
- [62] J. P. Lopes, N Hatziargyriou, J Mutale, P Djapic e N Jenkins. “Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities”. Em: *Electric power systems research* 77.9 (2007), pp. 1189–1203.
- [63] P. Luckow, B. Fagan, S. Fields e M. Whited. “Technical and Institutional barriers to the expansion of wind and solar energy”. Em: *Synapse: Cambridge, MA, USA* (2015).
- [64] M Luke, S Lee, Z Pekarek e A Dimitrova. *Blockchain in electricity: a critical review of progress to date*. 2018.

- [65] T. Lv e Q. Ai. “Interactive energy management of networked microgrids-based active distribution system considering large-scale integration of renewable energy resources”. Em: *Applied Energy* 163 (2016), pp. 408–422.
- [66] M. Mao, P. Jin, Y. Zhao, F. Chen e L. Chang. “Optimal allocation and economic evaluation for industrial PV microgrid”. Em: *2013 IEEE energy conversion congress and exposition*. IEEE. 2013, pp. 4595–4602.
- [67] J. Mattila, T. Seppälä, C. Naucler, R. Stahl, M. Tikkanen, A. Bådenlid, J. Seppälä et al. *Industrial blockchain platforms: An exercise in use case development in the energy industry*. Rel. téc. The Research Institute of the Finnish Economy, 2016.
- [68] J. Mattila et al. *The blockchain phenomenon—the disruptive potential of distributed consensus architectures*. Rel. téc. The Research Institute of the Finnish Economy, 2016.
- [69] E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini e C. Weinhardt. “Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid”. Em: *Applied Energy* 210 (2018), pp. 870–880.
- [70] G Meyers. “Germany’s Sonnenbatterie launches energy trading platform”. Em: *CleanTechnica*, December (2015).
- [71] “Microgrid Deployment Tracker 4Q18”. Em: Navigant Research. 2018, pp. 1–20.
- [72] M. Mihaylov, S. Jurado, N. Avellana, K. Van Moffaert, I. M. de Abril e A. Nowé. “NRGcoin: Virtual currency for trading of renewable energy in smart grids”. Em: *11th International conference on the European energy market (EEM14)*. IEEE. 2014, pp. 1–6.
- [73] M. Mylrea e S. N. G. Gourisetti. “Blockchain for smart grid resilience: Exchanging distributed energy at speed, scale and security”. Em: *2017 Resilience Week (RWS)*. IEEE. 2017, pp. 18–23.
- [74] M. Mylrea e S. N. G. Gourisetti. “Cybersecurity and Optimization in Smart “Autonomous” Buildings”. Em: *Autonomy and Artificial Intelligence: A Threat or Savior?* Springer, 2017, pp. 263–294.
- [75] S. Nakamoto et al. “Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system”. Em: (2008).
- [76] P. Palensky e D. Dietrich. “Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads”. Em: *IEEE transactions on industrial informatics* 7.3 (2011), pp. 381–388.
- [77] G. Papaefthymiou e K. Dragoon. “Towards 100% renewable energy systems: Uncapping power system flexibility”. Em: *Energy Policy* 92 (2016), pp. 69–82.
- [78] Y. Parag e B. K. Sovacool. “Electricity market design for the prosumer era”. Em: *Nature energy* 1.4 (2016), p. 16032.

- [79] J. Pascual, J. Barricarte, P. Sanchis e L. Marroyo. “Energy management strategy for a renewable-based residential microgrid with generation and demand forecasting”. Em: *Applied Energy* 158 (2015), pp. 12–25.
- [80] “Peak Demand in New York City: What’s the problem?” Em: (2015). URL: <http://www.peakpowerllc.com/notes/2015/2/17/whats-the-problem-with-peak-demand> (acedido em 27/08/2019).
- [81] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans e W. D’haeseleer. “Distributed generation: definition, benefits and issues”. Em: *Energy policy* 33.6 (2005), pp. 787–798.
- [82] A. Picciariello, K. Alvehag e L. Söder. “State-of-art review on regulation for distributed generation integration in distribution systems”. Em: *2012 9th International Conference on the European Energy Market*. IEEE. 2012, pp. 1–8.
- [83] A. Press. “New York climate plan sets 30-year goal for 100% renewable energy”. Em: *LA Times* (2019). URL: <https://www.latimes.com/world-nation/story/2019-07-20/new-york-climate-plan> (acedido em 15/08/2019).
- [84] C. L. Prete e B. F. Hobbs. “A cooperative game theoretic analysis of incentives for microgrids in regulated electricity markets”. Em: *Applied energy* 169 (2016), pp. 524–541.
- [85] “Reforming the energy vision”. Em: (2018). URL: <https://rev.ny.gov/> (acedido em 06/09/2019).
- [86] REN. *Dados Técnicos*. Lisboa, Portugal: Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A., 2016.
- [87] S. Sagiroglu, R. Terzi, Y. Canbay e I. Colak. “Big data issues in smart grid systems”. Em: *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. IEEE. 2016, pp. 1007–1012.
- [88] A. Salam, A. Mohamed e M. Hannan. “Technical challenges on microgrids”. Em: *ARPN Journal of engineering and applied sciences* 3.6 (2008), pp. 64–69.
- [89] R. Sauter e J. Watson. “Strategies for the deployment of micro-generation: Implications for social acceptance”. Em: *Energy Policy* 35.5 (2007), pp. 2770–2779.
- [90] R. Schleicher-Tappeser. “How renewables will change electricity markets in the next five years”. Em: *Energy policy* 48 (2012), pp. 64–75.
- [91] N. Schneider. “After the Bitcoin Gold Rush”. Em: *The New Republic* (2015). URL: newrepublic.com/article/121089/how-small-bitcoin-miners-lose-crypto-currency-boom-bust-cycle (acedido em 22/07/2019).
- [92] J. J. Sikorski, J. Haughton e M. Kraft. “Blockchain technology in the chemical industry: Machine-to-machine electricity market”. Em: *Applied Energy* 195 (2017), pp. 234–246.

- [93] J. Silvente, G. M. Kopanos, E. N. Pistikopoulos e A. Espuña. “A rolling horizon optimization framework for the simultaneous energy supply and demand planning in microgrids”. Em: *Applied Energy* 155 (2015), pp. 485–501.
- [94] H. Singh, S. Hao e A. Papalexopoulos. “Transmission congestion management in competitive electricity markets”. Em: *IEEE Transactions on power systems* 13.2 (1998), pp. 672–680.
- [95] A. Skajaa, K. Edlund e J. M. Morales. “Intraday trading of wind energy”. Em: *IEEE Transactions on Power Systems* 30.6 (2015), pp. 3181–3189.
- [96] V. Solar. “Going Solar in New York State”. Em: *Vivinth Solar* (2018). URL: <https://www.vivintsolar.com/blog/going-solar-in-new-york> (acedido em 02/08/2013).
- [97] M. Soshinskaya, W. H. Crijns-Graus, J. M. Guerrero e J. C. Vasquez. “Microgrids: Experiences, barriers and success factors”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40 (2014), pp. 659–672.
- [98] P. Sweco Ecofys Tractebel. “Local flexibility gap”. Em: *Study on the effective integration of Distributed Energy Resources for providing flexibility to the electricity system*. IEEE. 2015, pp. 31–38.
- [99] D. Tapscott e A. Tapscott. *Blockchain revolution: how the technology behind bitcoin is changing money, business, and the world*. Penguin, 2016.
- [100] R. Thomé. “Interoperabilidade em Geoprocessamento: conversão entre modelos conceituais de sistemas de informação Geográfica e Comparação com o Padrão Open GIS”. Em: *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, São José dos Campos* (1998).
- [101] L. Wang, X. Shen, J. Li, J. Shao e Y. Yang. “Cryptographic primitives in blockchains”. Em: *Journal of Network and Computer Applications* 127 (2019), pp. 43–58.
- [102] J. Winkler, M. Pudlik, M. Ragwitz e B. Pfluger. “The market value of renewable electricity—Which factors really matter?” Em: *Applied energy* 184 (2016), pp. 464–481.
- [103] M. Wolsink. “The research agenda on social acceptance of distributed generation in smart grids: Renewable as common pool resources”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.1 (2012), pp. 822–835.
- [104] M. Wolsink et al. “The next phase in social acceptance of renewable innovation”. Em: *EDI quarterly* 5.1 (2013), pp. 10–13.
- [105] J. Yli-Huomo, D. Ko, S. Choi, S. Park e K. Smolander. “Where is current research on blockchain technology?—a systematic review”. Em: *PloS one* 11.10 (2016), e0163477.

-
- [106] Y. Yoldaş, A. Önen, S. Mueeen, A. V. Vasilakos e bibinitperiodI. Alan. “Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72 (2017), pp. 205–214.
- [107] R. Zamora e A. K. Srivastava. “Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs”. Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.7 (2010), pp. 2009–2018.
- [108] C. Zhang, J. Wu, C. Long e M. Cheng. “Review of existing peer-to-peer energy trading projects”. Em: *Energy Procedia* 105 (2017), pp. 2563–2568.
- [109] Z. Zhang, G. Li e M. Zhou. “Application of microgrid in distributed generation together with the benefit research”. Em: *IEEE PES General Meeting*. IEEE. 2010, pp. 1–5.
- [110] Z. Zheng, S. Xie, H.-N. Dai e H. Wang. “Blockchain challenges and opportunities: A survey”. Em: *Work Pap.–2016* (2016).
- [111] Y. Zoka, A. Sugimoto, N. Yorino, K. Kawahara e J. Kubokawa. “An economic evaluation for an autonomous independent network of distributed energy resources”. Em: *Electric Power Systems Research* 77.7 (2007), pp. 831–838.